

# **PANDUAN PENGOPERASIAN**

## **SISTEM KENDALI MOTOR INDUKSI TIGA FASE BERKINERJA TINGGI**



**Penulis:**  
**Dr. Muchlas, M.T.**  
**Nuryono Satya Widodo, M.Eng.**  
**Barry Nur Setyanto, M.Pd.**  
**Dr. Budi Santosa**

**Yogyakarta 2020**

# PANDUAN

## Pengoperasian Simulator Sistem Kendali Motor Induksi Tiga Fase Berkinerja Tinggi

Dr. Muchlas, M.T.  
Nuryono Satya Widodo, S.T., M.Eng.  
Barry Nur Setyanto, M. Pd.  
Dr. Budi Santosa

Universitas Ahmad Dahlan  
Yogyakarta, Edisi Perbaikan 2020

# **KATA PENGANTAR**

Simulator Sistem Kendali Motor Induksi Tiga Fase Berkinerja Tinggi dalam panduan ini merupakan program aplikasi berbasis SIMULINK dari MATLAB yang dikembangkan sebagai media pembelajaran di kelas atau laboratorium.

Simulator ini dapat dimanfaatkan oleh dosen program studi Teknik Elektro untuk membantu menjelaskan cara kerja sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi menggunakan prinsip pengaturan tegangan dengan piranti *thyristor* terpicu pada mata kuliah/praktik Mesin-mesin Listrik atau Elektronika Daya. Penggunaan simulator ini secara langsung oleh mahasiswa dapat mempermudah kegiatan belajar secara mandiri. Tidak tertutup kemungkinan, simulator ini dapat digunakan pula oleh guru Sekolah Menengah Kejuruan untuk mendukung kegiatan pembelajaran mesin-mesin listrik.

Melalui panduan ini diharapkan pengguna dapat memperoleh informasi yang lengkap tentang cara pengoperasian produk simulator ini.

Panduan ini diterbitkan pertama kali pada Desember 2017, dan edisi ini merupakan perbaikan pertama yang dilakukan penulis pada masa-masa pandemi Covid-19.

Ucapan terimakasih disampaikan kepada para kolega dosen dan mahasiswa program studi Teknik Elektro Universitas Ahmad Dahlan yang telah ikut berpartisipasi dalam uji coba simulator ini.

Yogyakarta, April 2020

Dr. Muchlas, M.T.  
Ketua Penulis

# DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
KATA PENGANTAR .....	iv
DAFTAR ISI.....	v
A. SPESIFIKASI PRODUK .....	1
B. SISTEM KENDALI MOTOR BERKINERJA TINGGI.....	2
C. INSTALASI .....	4
D. SKENARIO OPERASI MOTOR .....	4
E. PENGATURAN PARAMETER SIMULATOR .....	6
F. MEMULAI SIMULASI .....	17
G. INTERPRETASI TAMPILAN OUTPUT .....	27
H. REKOMENDASI PENGGUNAAN .....	29
DAFTAR PUSTAKA .....	30

Simulator Sistem Kendali Motor Induksi Tiga Fase Berkinerja Tinggi ini merupakan perangkat yang dapat digunakan sebagai media praktik laboratorium maupun pembelajaran di kelas untuk mata kuliah Mesin-mesin Listrik atau Elektronika Daya pada program studi Teknik Elektro. Perangkat ini dapat membantu para mahasiswa dalam mempelajari cara pengendalian motor induksi tiga fase berkinerja tinggi. Sistemnya dilengkapi dengan unit *soft-starter* untuk mereduksi lonjakan arus dan torsi saat motor melakukan *start-up*, serta unit pendeteksi *stall* untuk mematikan catu daya mesin secara otomatis jika beban berlebihan.

#### A. SPESIFIKASI PRODUK

Agar simulator dapat dijalankan dengan baik dan digunakan sesuai fungsinya sebagai perangkat pembelajaran, penggunaannya perlu memperhatikan spesifikasi yang telah ditetapkan seperti dideskripsikan pada Tabel 1 berikut ini.

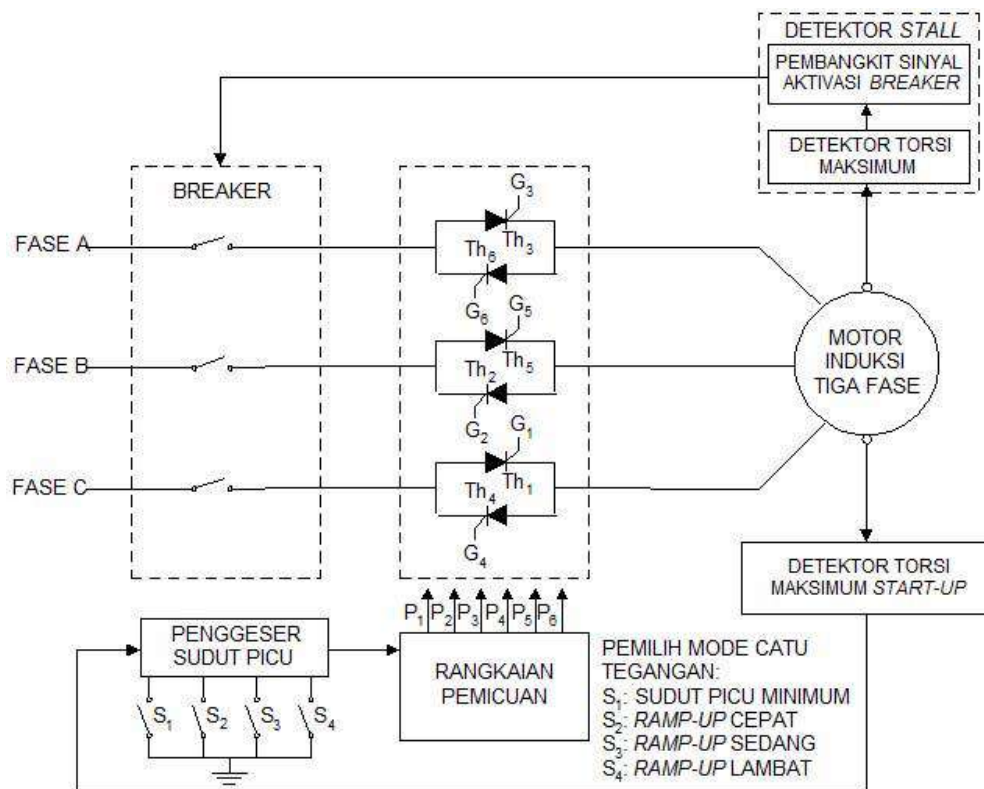
Tabel 1. Spesifikasi Simulator Sistem Kendali Motor Induksi Tiga Fase Berkinerja Tinggi

Perangkat/Fitur/Aspek	Spesifikasi
Perangkat Keras	PC/Laptop dengan: frekuensi <i>clock</i> prosesor minimal 1,8 GHz, kapasitas memori internal 2GB, kapasitas <i>harddisk</i> minimal 500 GB, resolusi monitor 1366x768 dpi ( <i>dot per inch</i> )
Perangkat Lunak	Sistem Operasi: Windows 7 di dalamnya terpasang program MATLAB minimal Versi 7 yang dapat menjalankan SIMULINK
Panel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menyediakan saklar Pemilih Skenario: Operasi Beban Normal dan Beban Lebih</li> <li>Menyediakan Pemilih Mode Catu Daya: Langsung, <i>Soft Start</i> Cepat, <i>Soft Start</i> Sedang, dan <i>Soft Start</i> Lambat</li> <li>Menyediakan <i>display</i> output untuk arus stator dan rotor, torsi elektromagnetik, kecepatan putar rotor, tegangan fase, dan pulsa pemicu dalam fungsi waktu.</li> </ul>
Model Motor	<ul style="list-style-type: none"> <li>Jenis: induksi <i>squirrel cage</i></li> <li><i>Name Plate</i>: (1) 3 HP, 60 Hz, 220 V, 1725 rpm; (2) 5,4 HP, 400 V, 50 Hz, 1430 rpm; (3) 10 HP, 400 V, 50 Hz, 1440 rpm; (4) 20 HP, 400 V, 50 Hz, 1460 rpm; (5) 50 HP, 400 V, 50 Hz, 1480 rpm; (6) 100 HP, 400 V, 50 Hz, 1484 rpm; (7) 150 HP, 400 V, 50 Hz, 1487 rpm; (8) 215 HP, 400 V, 50 Hz, 1487 rpm.</li> </ul>
Model Sistem Kendali	<ul style="list-style-type: none"> <li>Jenis: pengendalian tegangan stator menggunakan 6 buah <i>thyristor</i> sebagai <i>switching</i> dengan konfigurasi <i>back-to-back</i> pada setiap fase dan dilengkapi generator pulsa tersinkronisasi</li> <li>Fitur Kinerja Tinggi: <i>soft-starter</i> untuk keadaan transien dan detektor <i>stall</i> untuk keadaan <i>steady-state</i></li> </ul>
Mode Tegangan Catu	<ul style="list-style-type: none"> <li>Langsung dengan sudut Alpha minimum sebesar 19° listrik</li> <li>Tegangan <i>ramp-up</i> sebanyak 3 pilihan: cepat, sedang dan lambat</li> </ul>
Skenario Operasi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operasi Beban Normal: sistem diberi beban konstan normal selama 10 s (<math>t=0</math> s.d. <math>t=10</math> s)</li> <li>Operasi Beban Lebih: sistem diberi beban bervariasi dengan kondisi Normal-1 selama 6 s (<math>t=0</math> s.d. <math>t=6</math> s), kondisi Normal-2 selama 2 s (<math>t=6</math> s s.d. <math>t=8</math> s), dan kondisi beban lebih selama 2 s (<math>t=8</math> s s.d. 10 s).</li> </ul>
Aspek Pedagogi	<ul style="list-style-type: none"> <li>User: Dosen/mahasiswa jurusan Teknik Elektro dan jurusan sejenis</li> <li>Mata Kuliah: Mesin Listrik, Sistem Proteksi, Sistem Berbasis Mikroprosesor</li> <li>Prasyarat: dapat mengoperasikan SIMULINK dari MATLAB</li> <li>Penggunaan: Media pembelajaran di kelas, <i>virtual lab</i> untuk praktik di laboratorium</li> <li>Waktu penggunaan: 90 menit sebagai media di kelas atau piranti <i>virtual lab</i></li> </ul>

## B. SISTEM KENDALI MOTOR BERKINERJA TINGGI

Sistem kendali motor berkinerja tinggi yang dimaksud dalam perangkat pembelajaran ini adalah sebuah gabungan piranti-piranti listrik dan elektronik yang dapat melakukan pengaturan tegangan catu untuk mereduksi lonjakan arus dan torsi saat mesin melakukan *start-up*. Selain itu, dalam keadaan *steady-state* sistem dapat memutus catu tegangan secara otomatis ketika torsi beban melebihi torsi maksimum yang dibangkitkan sehingga motor terhindar dari keadaan *stall*, yakni keadaan rotor berhenti berputar dengan tegangan masih terpasang pada ujung-ujung stator. Jika catu tegangan tidak segera diputus, keadaan *stall* dapat menimbulkan kerusakan belitan motor.

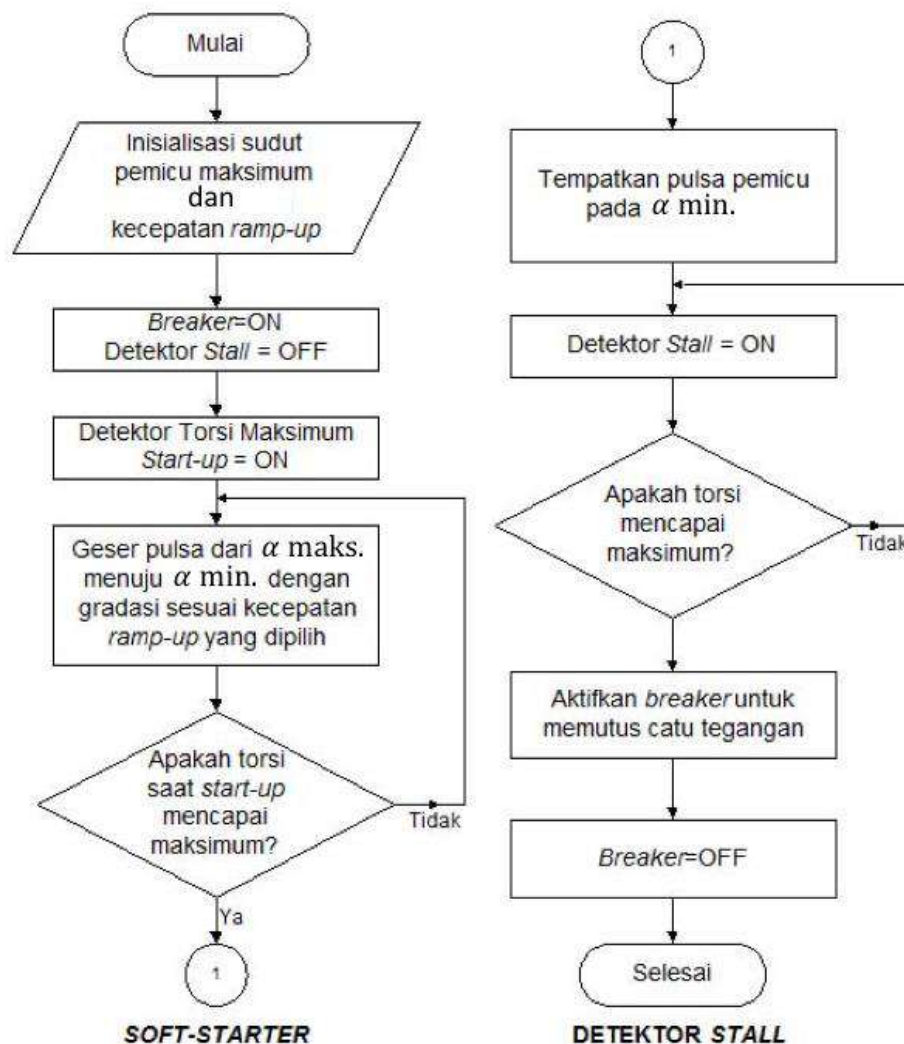
Untuk mengatasi hal ini, sistem kendali perlu dilengkapi dengan pendeteksi torsi sehingga *power line* segera dapat diputus secara otomatis jika terdeteksi potensi munculnya *stall* yang ditunjukkan oleh naiknya torsi menuju ke nilai maksimum. Model pengendalian yang digunakan adalah pengaturan tegangan stator dengan piranti *switching* terdiri atas 6 buah *thyristor* yang dipasang secara *back-to-back* pada setiap fase tegangan pencatu seperti ditunjukkan pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Arsitektur Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi



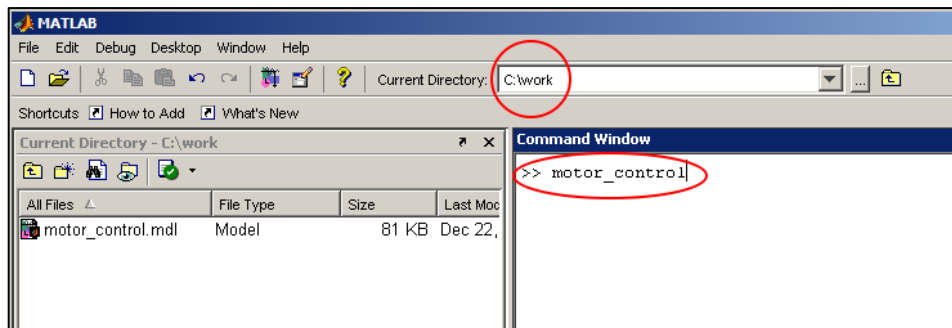
Pemicuan setiap *thyristor* dilakukan oleh sebuah *firing circuit* yang di dalamnya terkandung rangkaian generator yang mampu membangkitkan pulsa tersinkronisasi sebanyak 6 buah. Pemilihan mode catu dilakukan oleh rangkaian penggeser pulsa yang menyediakan 4 mode yakni catu menggunakan sudut alfa minimum (catu langsung), *ramp-up* cepat, *ramp-up* sedang, dan *ramp-up* lambat. Pada mode catu menggunakan sudut pemicuan minimum, sistem ini hanya dapat memberikan sudut picu paling rendah 19° listrik. Mode catu menggunakan tegangan *ramp-up* merupakan implementasi dari sistem kendali *soft-start*. Algoritma pengendalian untuk fitur *soft-starter* dan detektor keadaan *stall* ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Algoritma Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi

### C. INSTALASI

Pastikan anda telah memperoleh *file* dalam format model SIMULINK dengan nama **motor\_control.mdl**. Anda dapat memperoleh *file* tersebut dengan melakukan *download* dan ekstraksi dari *link* [http://muchlas.ee.uad.ac.id/downloads/motor\\_control.zip](http://muchlas.ee.uad.ac.id/downloads/motor_control.zip). Buatlah folder **C:\work** pada komputer/laptop anda dan *copy file* **motor\_control.mdl** ke dalam *folder* tersebut. Jalankan MATLAB dan ubahlah *current directory* menjadi **C:\work** seperti gambar di bawah ini. Selanjutnya melalui *Command Window* ketik **motor\_control** diteruskan menekan **Enter/Return**.

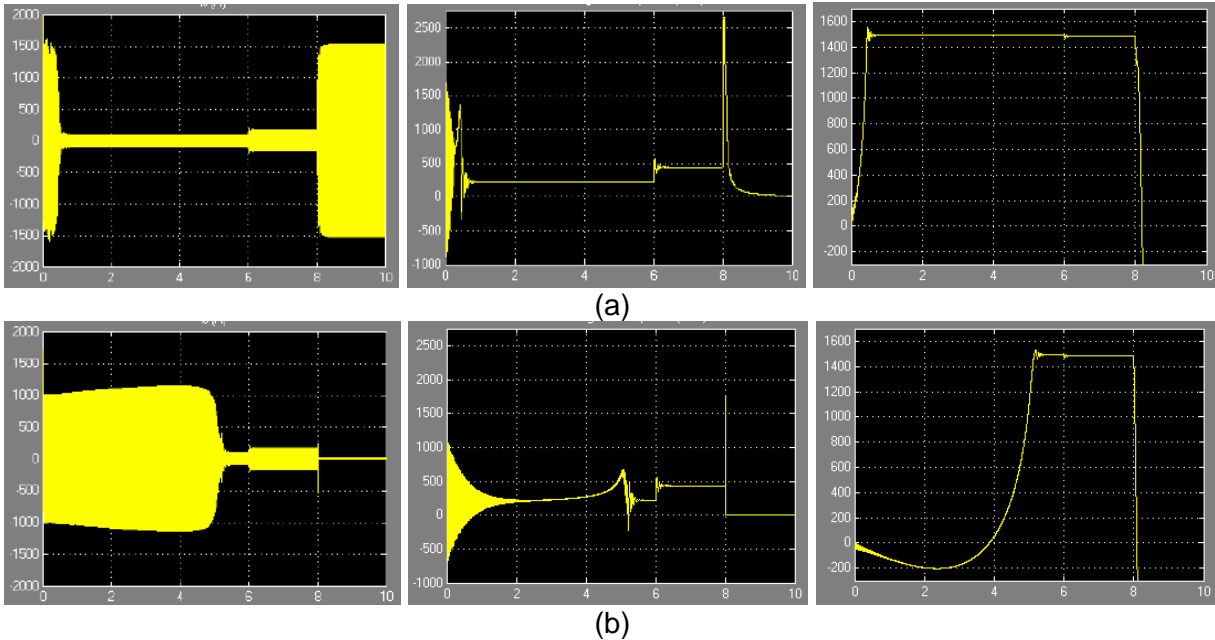


Gambar 3. *Current Directory* Untuk Menjalankan Simulator

### D. SKENARIO OPERASI MOTOR

Sebagai perangkat pembelajaran, operasi motor pada simulator ini perlu dikondisikan dalam berbagai situasi untuk menunjukkan kemampuan sistem kendali dalam mengantisipasi melonjaknya arus dan torsi saat *start-up* serta mengantisipasi perubahan-perubahan torsi beban saat *steady-state* yang dapat menyebabkan *stall*. Perangkat ini menyediakan dua jenis skenario operasi yakni normal dan beban lebih. Pemilihan skenario pertama (operasi normal) akan menyebabkan motor diberi torsi beban konstan **Normal-1** selama waktu berlangsungnya simulasi. Pada mode normal ini, motor tidak mengalami gangguan penambahan beban baik beban normal maupun beban lebih selama keadaan transien sampai dengan *steady-state*. Skenario kedua (operasi beban lebih) adalah motor diberi beban yang berubah-ubah selama berlangsungnya simulasi. Saat awal ( $t=0$  s.d.  $t=6$  s) motor diberi beban **Normal-1**, selanjutnya pada  $t=6$  s sampai dengan  $t=8$  s motor diberi tambahan beban menjadi sebesar **Normal-2** menyebabkan arus stator dan torsi elektromagnetik meningkat namun tidak menimbulkan keadaan *stall*, sedangkan pada  $t=8$  s sampai dengan 10 s motor diberi **beban lebih** menyebabkan arus stator dan torsi naik melebihi torsi yang dapat dibangkitkan motor, sehingga menyebabkan kondisi *stall*. Gambar 4 menunjukkan ilustrasi skenario operasi normal dan operasi beban lebih untuk grafik karakteristik arus stator pada motor induksi jenis 100 HP yang dicatu menggunakan tegangan dengan mode *soft-start* lambat.

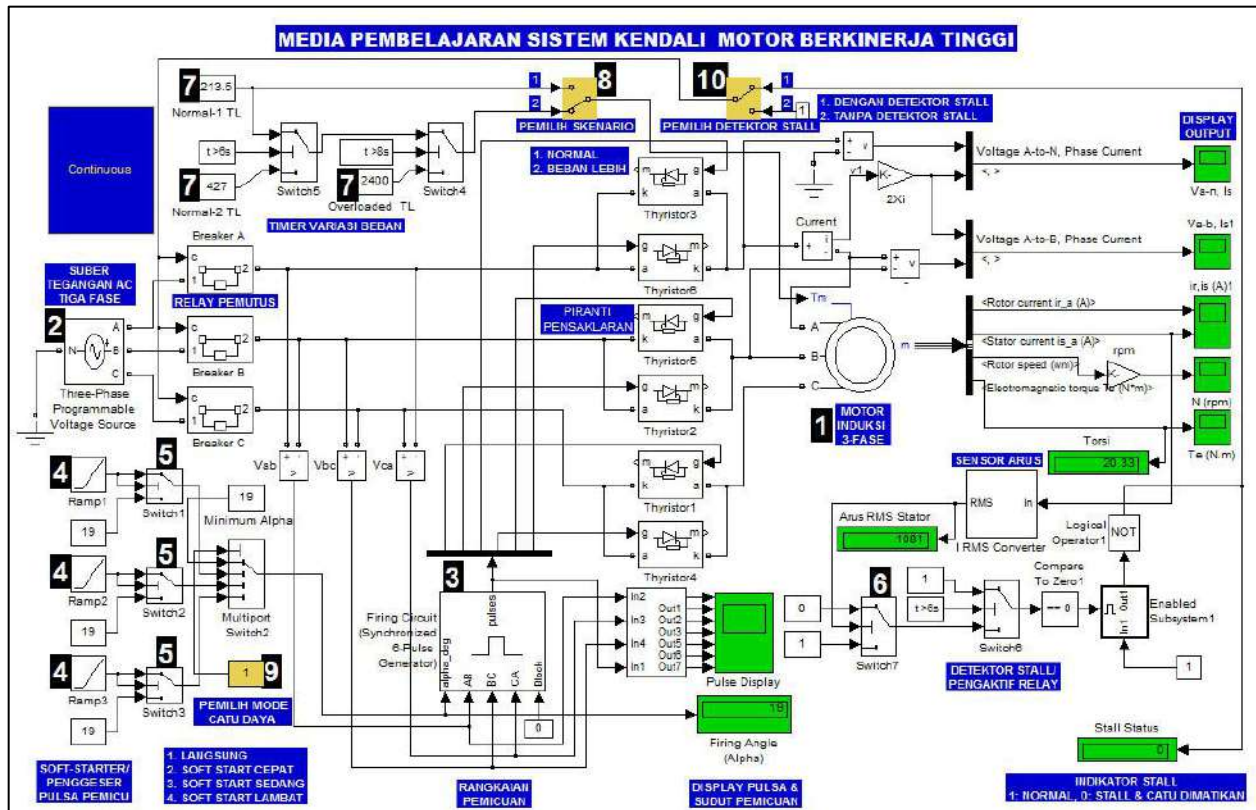




Gambar 4. Karakteristik dinamis Motor Induksi 100 HP: (a) Dicatu Langsung; dan (b) Dicatu Dengan Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi

#### E. PENGATURAN PARAMETER SIMULATOR

Sebelum simulator dijalankan, perlu diatur terlebih dahulu parameter-parameternya agar dapat berjalan dengan baik. Jalankan simulator dengan menuliskan **motor\_control** pada jendela perintah (*Command Window*) dari MATLAB, dan diteruskan dengan menekan ENTER, sehingga akan muncul tampilan seperti gambar berikut ini.



Gambar 5. Tampilan Panel Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi

### 1. Pemilihan Jenis Motor (Langkah ❶)

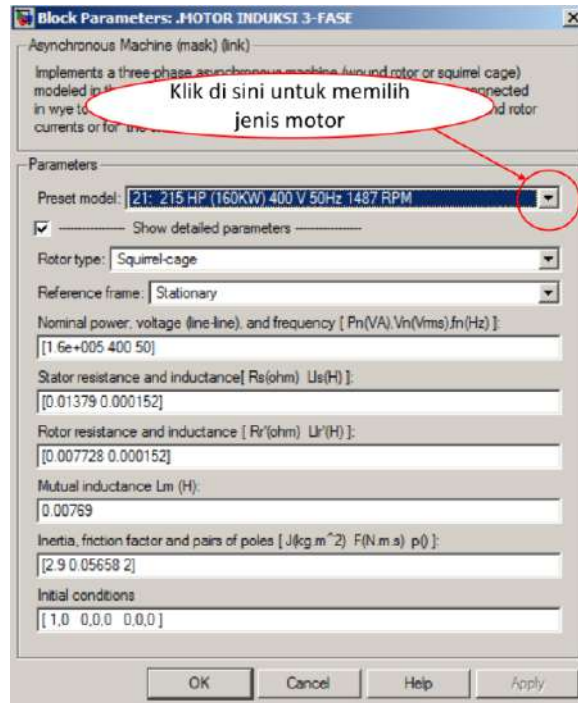
Langkah awal pengoperasian simulator ini adalah memilih jenis motor. Produk ini hanya menyediakan 8 buah motor yang dapat dipilih seperti pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Jenis Motor Induksi yang Tersedia Untuk Simulasi

No.	Jenis Motor/Name Plate	Parameter							
		$R_s$ ( $\Omega$ )	$L_{ls}$ (mH)	$R_r$ ( $\Omega$ )	$L_{lr}$ (mH)	$L_m$ (mH)	$J$ (kg.m <sup>2</sup> )	$F$ (N.m.s)	$p$
1	215HP (160KW), 400V, 50Hz, 1487rpm	0,01379	0,152	0,007728	0,152	7,69	2,9	0,05658	2
2	150HP (110KW), 400V, 50Hz, 1487rpm	0,02155	0,226	0,01231	0,226	10,38	2,3	0,05421	2
3	100HP (75KW), 400V, 50 Hz, 1484rpm	0,03552	0,335	0,02092	0,335	15,1	1,25	0,03914	2
4	50HP (37KW), 400V, 50 Hz, 1480rpm	0,08233	0,724	0,0503	0,724	27,11	0,37	0,02791	2
5	20HP (15KW), 400V, 50Hz, 1460rpm	0,2147	0,991	0,2205	0,991	64,19	0,102	0,009541	2
6	10HP (7,5KW), 400V, 50Hz, 1440rpm	0,7384	3,045	0,7402	3,045	124,1	0,0343	0,000503	2
7	5,4HP (4KW), 400V, 50Hz, 1430rpm	1,405	5,839	1,395	5,839	172,2	0,0131	0,002985	2
8	3HP, 220V, 60Hz, 1725rpm	0,435	4	0,816	2	69,31	0,089	0	2

Misal akan digunakan jenis motor 215 HP (160 KW), 400 V, 50 Hz, 1487 rpm, maka lakukan **double-click** pada tengah-tengah simbol motor (bertanda ❶), kemudian pilihlah jenis

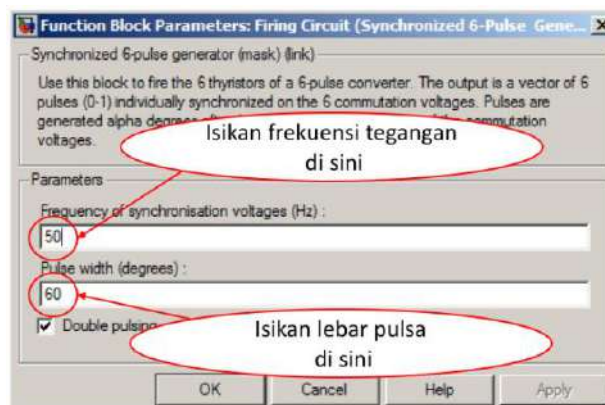
motor pada nomor 21 dan pastikan jendela blok motor seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Jendela Blok Motor Induksi 3-Fase

## 2. Pengaturan Parameter Rangkaian Pemicuan (Langkah ②)

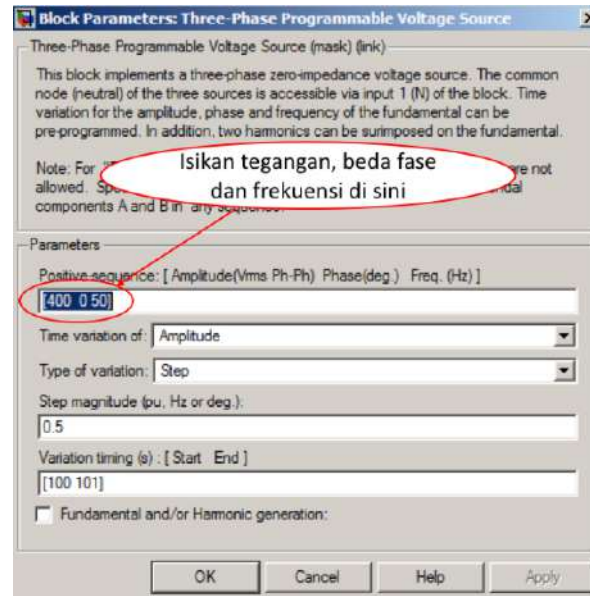
Parameter rangkaian pemicuan terdiri atas dua besaran yakni frekuensi tegangan sinkronisasi dalam satuan Hz dan lebar pulsa sinkronisasi dalam derajat listrik. Untuk mengatur kedua parameter tersebut, **double click** pada blok *Firing Circuit* (bertanda ②), isikan frekuensi tegangan sesuai dengan jenis motor yang digunakan, dalam hal ini  $f=50$  Hz dan lebar pulsa dengan 60 derajat listrik, pastikan jendela blok seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Jendela Blok *Firing Circuit*

### 3. Pengaturan Parameter Sumber Tegangan (Langkah ③)

Untuk mengatur parameter sumber tegangan, **double click** pada blok *Three-Phase Programmable Voltage Source* (bertanda ③), selanjutnya isikan nilai tegangan, beda fase dan frekuensi sumber sesuai dengan jenis motor yang digunakan, seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Jendela Blok *Three-Phase Voltage Source*

### 4. Pengaturan Parameter Kecepatan Penggeseran Pulsa (Langkah ④)

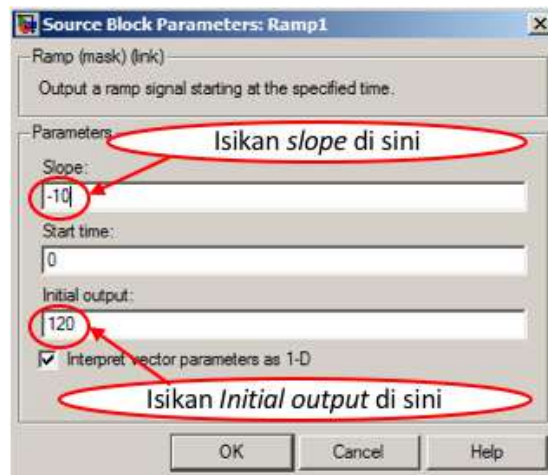
Pada rangkaian *soft starter*/penggeser pulsa terdapat unit pembangkit bilangan *decrement*, yakni pulsa pemicuan yang nilainya berubah semakin kecil terhadap bertambahnya waktu. Implementasi unit ini menggunakan blok *Ramp* dengan tiga parameter yakni *Slope*, *Start time* dan *Initial output*. Untuk ketiga jenis kecepatan *soft-starter*, pengaturan parameter blok *Ramp* pada unit ini ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Blok *Ramp* Untuk Berbagai Kecepatan *Soft-Start*

No.	Jenis Motor/ Name Plate	Blok Ramp1 (Soft-Start Cepat)			Blok Ramp2 (Soft-Start Sedang)			Blok Ramp3 (Soft-Start Lambat)		
		<i>Slope</i> (o/s)	<i>Start Time</i> (s)	<i>Initial Output</i> (o)	<i>Slope</i> (o/s)	<i>Start Time</i> (s)	<i>Initial Output</i> (o)	<i>Slope</i> (o/s)	<i>Start Time</i> (s)	<i>Initial Output</i> (o)
1	215HP (160KW), 400V, 50Hz, 1487rpm	-10	0	120	-5	0	120	-1	0	120
2	150HP (110KW), 400V, 50Hz, 1487rpm	-10	0	120	-5	0	120	-1	0	120
3	100HP (75KW), 400V, 50 Hz, 1484rpm	-10	0	120	-5	0	120	-1,2	0	120
4	50HP (37KW), 400V, 50 Hz, 1480rpm	-30	0	120	-10	0	120	-4	0	120
5	20HP (15KW), 400V, 50Hz, 1460rpm	-50	0	132	-25	0	132	-15	0	132

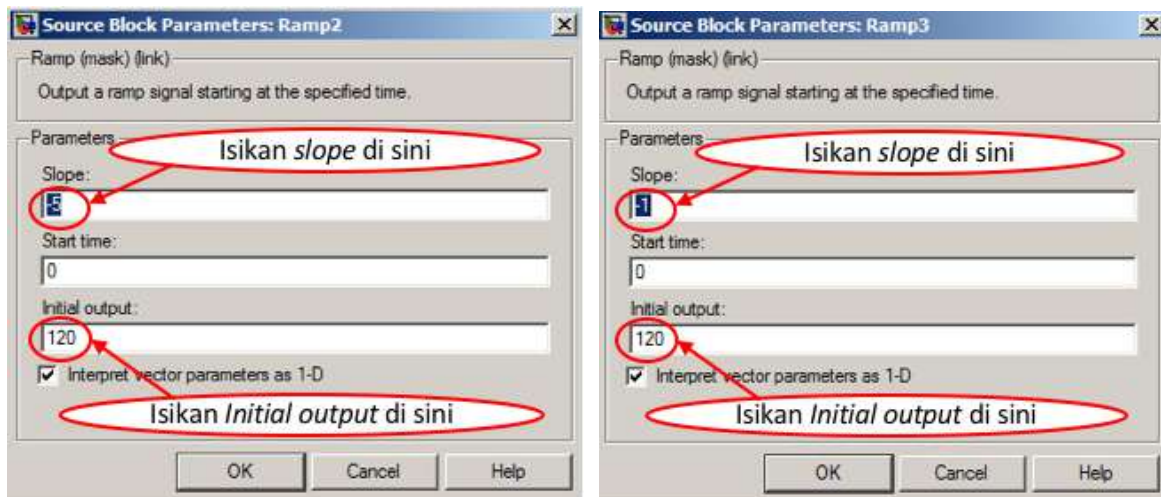
6	10HP (7,5KW), 400V, 50Hz, 1440rpm	-100	0	132	-60	0	132	-30	0	132
7	5,4HP (4KW), 400V, 50Hz, 1430rpm	-100	0	132	-70	0	132	-30	0	132
8	3HP, 220V, 60Hz, 1725rpm	-100	0	115	-50	0	115	-15	0	115

Mulailah dengan **double-click** pada blok *Ramp1* (bertanda ❹), dan isikan nilai-nilai parameter sesuai Tabel 3. Untuk motor jenis 215HP (160KW), 400V, 50Hz, 1487rpm, pengaturan parameter blok *Ramp1*, ditunjukkan pada gambar 9 berikut ini.



Gambar 9. Pengaturan Parameter Untuk Blok *Ramp1*

Selanjutnya lakukan hal yang sama dengan pengaturan parameter pada blok *Ramp1* di atas, untuk blok *Ramp2* dan blok *Ramp3*. Pengaturan parameter blok *Ramp2* dan *Ramp3* untuk motor 215 HP, ditunjukkan pada Gambar 10 berikut ini.



Gambar 10. Pengaturan Parameter Blok *Ramp2* (kiri) dan Blok *Ramp3* (kanan)

#### 5. Pengaturan Parameter Batas Ambang Alfa Saat Mencapai Torsi Maksimum (Langkah ⑤)

Batas ambang alfa adalah nilai sudut pemecuan *thyristor* yang menyebabkan torsi mencapai nilai maksimumnya saat motor melakukan *start-up* dengan cara *soft-start*. Simulator ini menggunakan nilai batas ambang untuk ketiga ragam kecepatan *soft-start* (cepat, sedang, lambat) seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

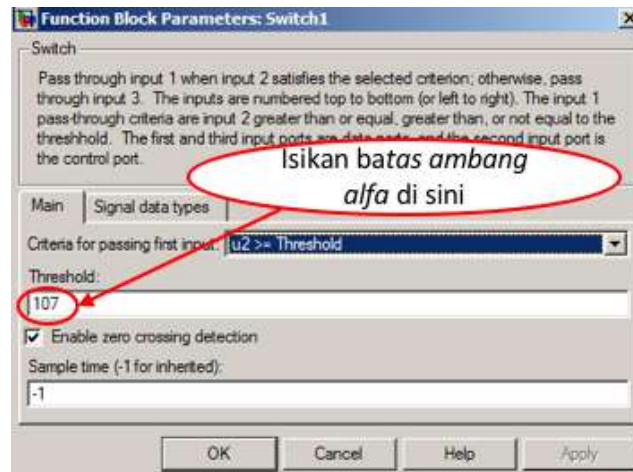
Tabel 4. Parameter Batas Ambang Alfa Saat Torsi Mencapai Nilai Maksimum

No.	Jenis Motor/ Name Plate	Parameter Batas Ambang (Threshold) Alfa (°)		
		Blok Switch1 (Cepat)	Blok Switch2 (Sedang)	Blok Switch3 (Lambat)
1	215HP (160KW), 400V, 50Hz, 1487rpm	107	111,2	116.93
2	150HP (110KW), 400V, 50Hz, 1487rpm	105,6	110,1	116,2
3	100HP (75KW), 400V, 50 Hz, 1484rpm	106,5	110,4	113,75
4	50HP (37KW), 400V, 50 Hz, 1480rpm	101	108,4	110,9
5	20HP (15KW), 400V, 50Hz, 1460rpm	110	117	120
6	10HP (7,5KW), 400V, 50Hz, 1440rpm	100	105	110
7	5,4HP (4KW), 400V, 50Hz, 1430rpm	102	107	112
8	3HP, 220V, 60Hz, 1725rpm	82	85	88

Sesuai Gambar 1 dan Gambar 2 di muka, simulator sistem kendali motor berkinerja tinggi ini dilengkapi dengan detektor torsi maksimum. Saat *start-up*, motor diberi catu tegangan *Ramp-up*, yakni tegangan dengan nilai yang berubah secara gradual dari rendah ke tinggi terkendali oleh pulsa pemecuan. Walaupun belum mencapai *steady-state*, jika terdeteksi adanya nilai torsi di sekitar nilai maksimumnya, sistem akan menempatkan sudut pulsa pemecuan (alfa) pada nilai minimumnya yakni 19 derajat listrik. Detektor torsi maksimum ini diimplementasikan menggunakan 3 buah blok *Switch1* (untuk *soft-start* cepat), *Switch2* (untuk *soft-start* sedang), dan *Switch3* (untuk *soft-start* lambat). Nilai batas ambang alfa yang bersesuaian dengan tercapainya torsi maksimum pada blok *Switch* adalah parameter *threshold* yang nilainya ditunjukkan pada Tabel 4.

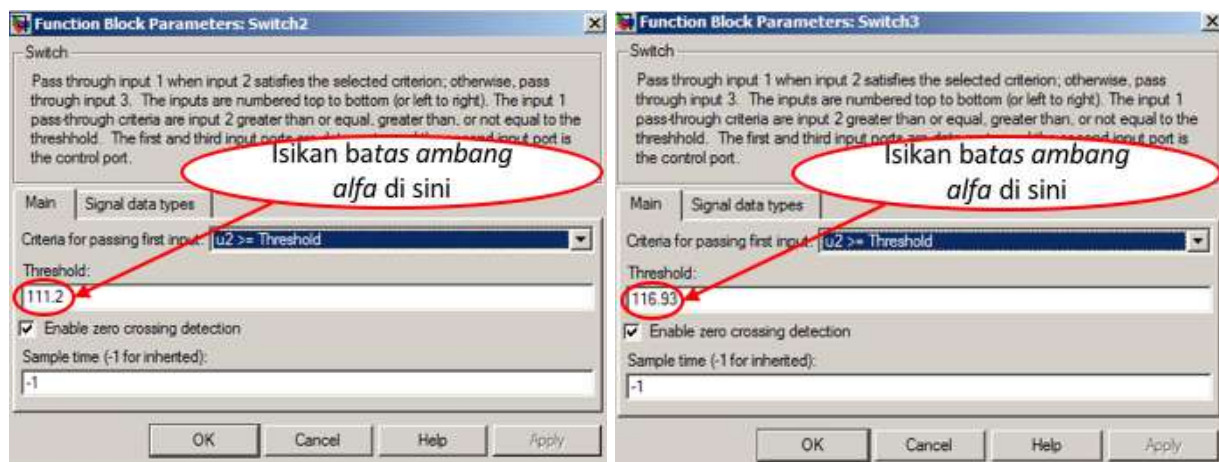
Lakukan pengaturan parameter *threshold* dengan **double click** pada blok *Switch1* (bertanda ⑤), dan isikan nilainya sesuai dengan jenis motor pada Tabel 4, sehingga akan tampil jendela blok seperti pada Gambar 11.





Gambar 11. Pengaturan Parameter *Threshold* Untuk Blok *Switch1*

Selanjutnya, lakukan pengaturan parameter *threshold* untuk blok-blok lainnya yakni *Switch2* dan *Switch3* dengan cara seperti pada pengaturan blok *Switch1*, sehingga akan nampak jendela blok pada Gambar 12.



Gambar 12. Pengaturan Parameter Blok *Switch2* (kiri) dan *Switch3* (kanan)

## 6. Pengaturan Parameter Batas Ambang Arus *Stall* (Langkah ⑥)

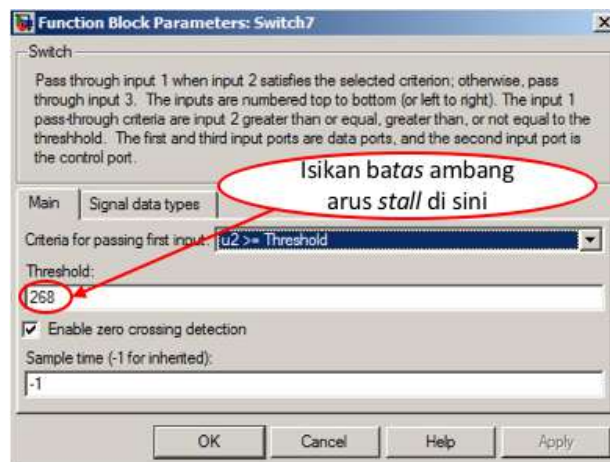
Sistem kendali pada simulator ini dilengkapi dengan *stall detector* yang akan mematikan

catu daya jika motor dikenai beban lebih. Untuk mendeteksi keadaan *stall*, sistem ini menggunakan arus stator sebagai indikatornya. Detektor arus lebih diimplementasikan dengan menggunakan blok *Switch7*, sehingga parameter batas ambangnya harus diatur terlebih dahulu sebelum simulator dijalankan. Batas ambang arus stator yang bersesuaian dengan keadaan *stall* untuk berbagai jenis motor ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Parameter Batas Ambang Arus Stator Saat Terjadi Kondisi *Stall*

No.	Jenis Motor/ <i>Name Plate</i>	Parameter Batas Ambang Arus Stall Blok <i>Switch7</i> (A)
1	215HP (160KW), 400V, 50Hz, 1487rpm	268
2	150HP (110KW), 400V, 50Hz, 1487rpm	209
3	100HP (75KW), 400V, 50 Hz, 1484rpm	169
4	50HP (37KW), 400V, 50 Hz, 1480rpm	106
5	20HP (15KW), 400V, 50Hz, 1460rpm	50
6	10HP (7,5KW), 400V, 50Hz, 1440rpm	24
7	5,4HP (4KW), 400V, 50Hz, 1430rpm	14
8	3HP, 220V, 60Hz, 1725rpm	40

Lakukan pengaturan parameter batas ambang arus *stall* dengan **double click** pada blok *Switch7* (bertanda ⑥), dan isikan parameter *threshold* sesuai dengan jenis motor pada Tabel 5, sehingga akan tampil jendela seperti pada Gambar 13.



Gambar 13. Pengaturan Parameter Blok *Switch7*

## 7. Pengaturan Torsi Beban Motor (Langkah ⑦)

Sesuai dengan skenario operasi motor, beban torsi pada simulator ini terdiri atas beban torsi Normal 1, Normal 2 dan Overloaded. Nilai-nilai dari beban-beban tersebut untuk semua jenis motor yang tersedia pada simulator ini ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Beban Motor Untuk Operasi Normal dan Beban Lebih (*Overloaded*)

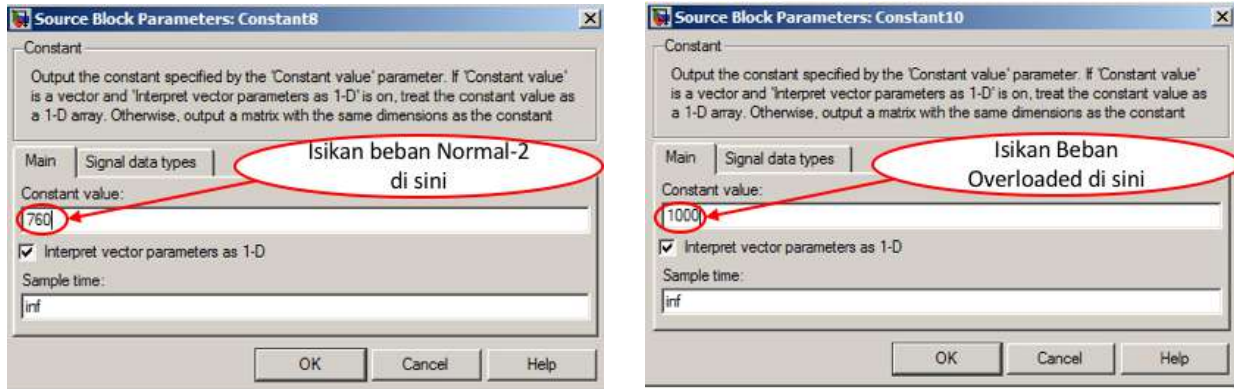
Jenis Motor	Torsi Beban Motor (N m)		
	Normal 1 (t=0 s s.d. t=6 s)	Normal 2 (t=6 s s.d. t=8 s)	Overloaded (t=8 s s.d. t=10 s)
215 HP	380	760	1000
150 HP	277	554	800
100 HP	213,5	427	600
50 HP	110	220	400
20 HP	42	84	200
10 HP	22	44	88
5,4 HP	11	22	50
3 HP	10	20	50

Pengaturan beban torsi Normal 1 dilakukan dengan cara **double click** pada blok Normal-1 TL (bertanda 7), dan isikan nilai bebannya sesuai dengan Tabel 6 sehingga tampak jendela blok seperti pada Gambar 14.



Gambar 14. Pengaturan Parameter Blok *Constan9* (Beban Torsi Normal-1)

Selanjutnya, isikan beban torsi Normal 2 dan *Overload* sesuai Tabel 6, sehingga terlihat blok *Constan8* dan *Constan10* seperti Gambar 15.



Gambar 15. Pengaturan Parameter Blok Beban Torsi Normal-2 (kiri) dan Overload (kanan)

### 8. Pemilihan Skenario Operasi (Langkah ⑧)

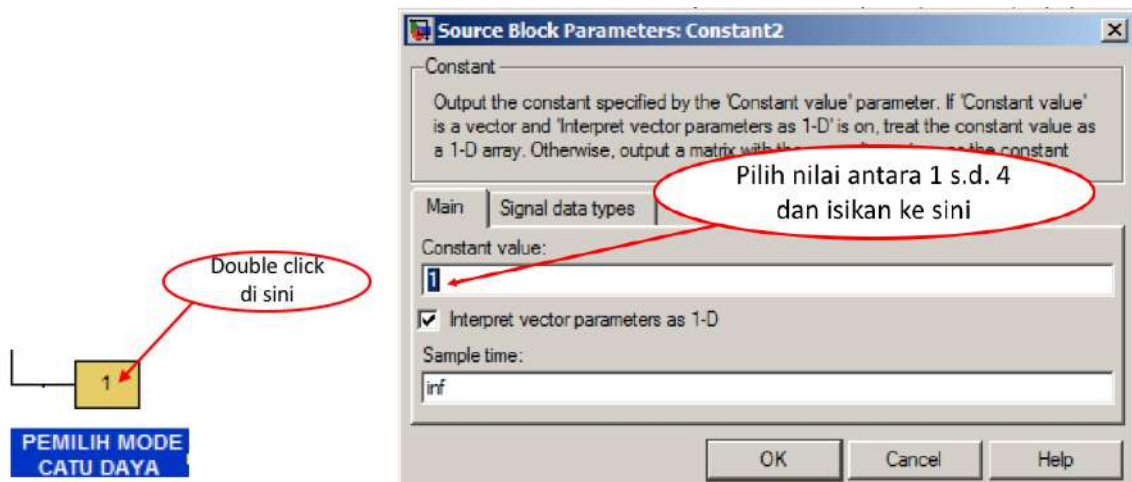
Gunakan pemilih skenario untuk memilih satu dari dua skenario yang disediakan. Untuk mengawali penggunaan simulator ini, pilihlah mode operasi normal. Lakukan **double click** pada simbol saklar berwarna kuning untuk memilih operasi normal. Penekanan **double click** berikutnya akan menyebabkan operasi beban lebih (*overloaded*) dipilih. Arti dari notasi pada saklar adalah 1 untuk operasi normal dan 2 untuk operasi *overloaded*. Kondisi saklar pemilih untuk kedua skenario operasi motor ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Saklar Pemilih Skenario Operasi: (a) Normal (Kiri), (b) Beban Lebih (Kanan)

### 9. Pemilihan Mode Pencatu Tegangan (Langkah ⑨)

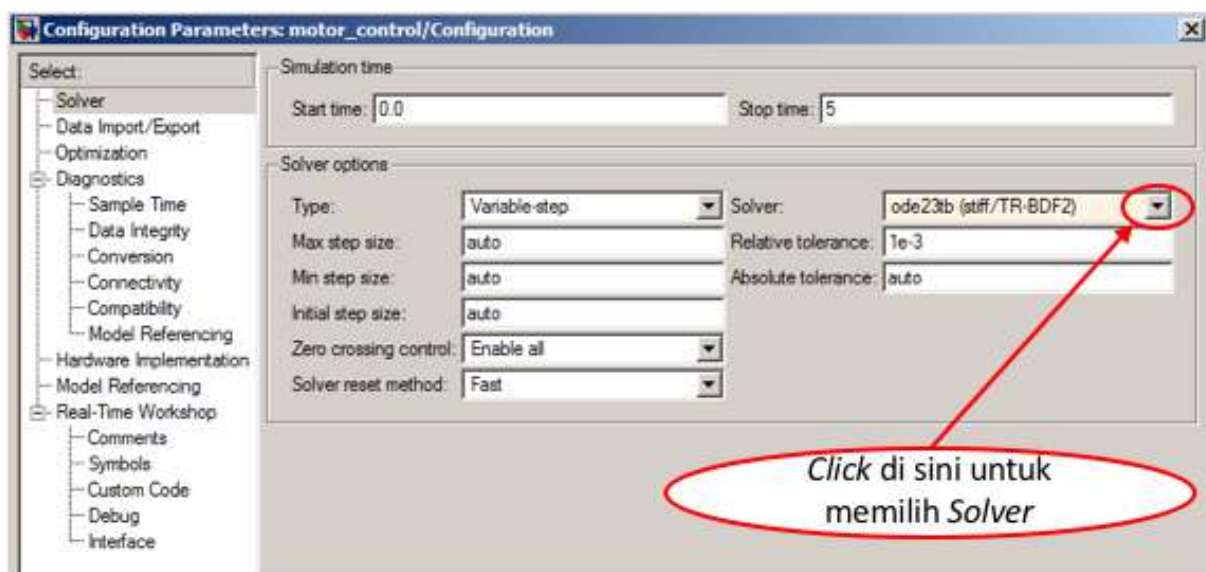
Langkah berikutnya dalam menjalankan perangkat ini adalah memilih mode pencatu tegangan. Sistem ini menyediakan empat jenis mode pencatu tegangan yakni catu dengan: (1) sudut pemicuan minimum sebesar 19° listrik (catu langsung), (2) tegangan *ramp-up* berkecepatan tinggi (*Soft Start* Cepat); (3) tegangan *ramp-up* berkecepatan sedang (*Soft Start* Sedang); dan (4) tegangan *ramp-up* berkecepatan rendah (*Soft Start* Lambat). Jenis catu pertama akan memberikan catu tegangan yang konstan selama keadaan transien sampai dengan *steady-state*, sedangkan jenis catu ke 2, 3 dan 4 akan menyediakan tegangan *ramp-up* dari level rendah ke tinggi dengan tiga kecepatan yang dapat dipilih yakni cepat, sedang, dan rendah. Pemilihan modenya dilakukan dengan cara **double click** terlebih dahulu pada kotak kuning dilanjutkan dengan mengisi konstanta sesuai pilihan mode seperti gambar berikut ini.



Gambar 17. Panel Pemilih Mode Pencatu Tegangan

#### 10. Pengaturan Konfigurasi Parameter Simulasi (Langkah 10)

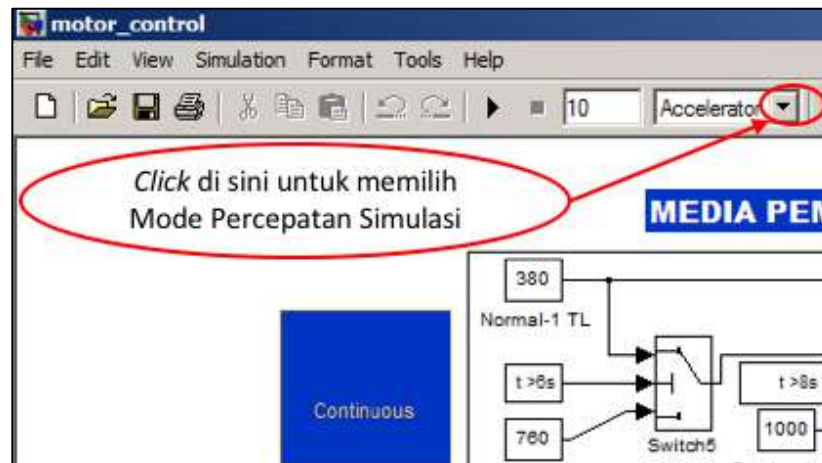
Sebelum simulator dijalankan, perlu dilakukan pengaturan parameter simulasi agar prosesnya dapat berlangsung dengan baik. Untuk mengatur parameter simulasi klik pada **Simulation→Configuration Parameters**. Selanjutnya pastikan pada bagian *Simulation Time* telah terisi data *Start time=0.0* dan *Stop time=10*, yang menunjukkan bahwa waktu simulasi yang ditentukan adalah 10 detik (10 s). Pastikan juga *solver* persamaan diferensial yang digunakan adalah **ode23tb (stiff/TR-BDF2)**. Secara lebih detil, pastikan *setting-up* parameter simulasi sesuai dengan konfigurasi pada gambar berikut ini.



Gambar 18. Pengaturan Parameter Simulasi



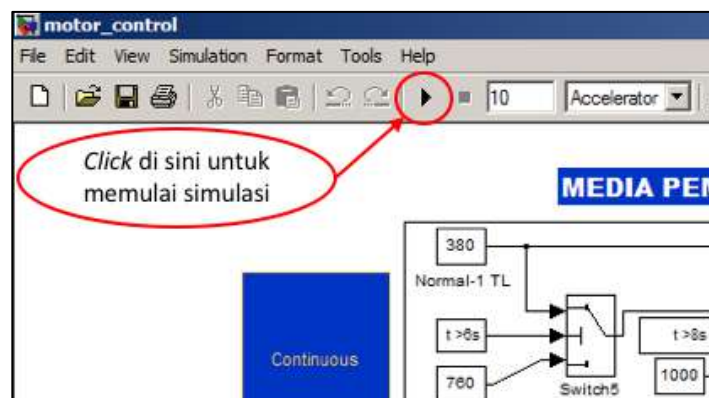
Pengaturan terakhir yang perlu dilakukan adalah mengubah mode percepatan (*acceleration mode*) dari normal ke mode *accelerator*. Langkah ini dilakukan untuk mempercepat proses simulasi sehingga pengguna tidak terlalu lama menunggu berakhirnya simulasi. Pastikan pengaturan tersebut menghasilkan tampilan seperti pada gambar 19.



Gambar 19. Pengaturan Mode Percepatan ke *Accelerator*

## F. MEMULAI SIMULASI

Setelah 10 langkah pengaturan di atas dilakukan dengan benar, simulator telah siap digunakan untuk memulai simulasi. Mulailah simulasi dengan menekan tombol **Start Simulation**, yakni tombol yang bergambar tanda panah ke kanan.



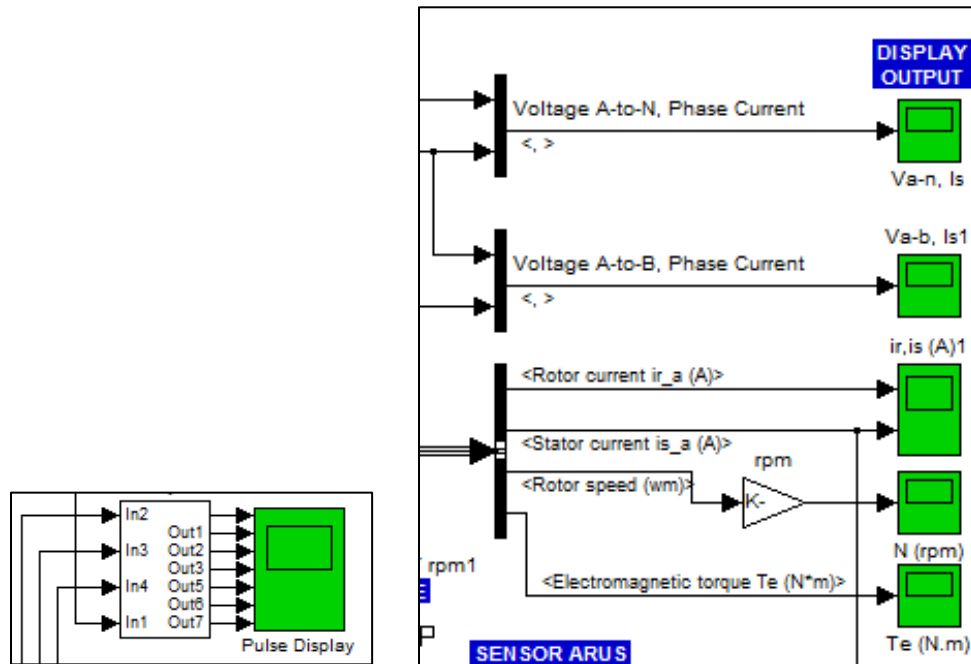
Gambar 20. Jendela Untuk Memulai Simulasi

### 1. Menampilkan Grafik Karakteristik Dinamis

Selama simulasi berlangsung, pengguna dapat menampilkan output dari sistem kendali ini untuk berbagai besaran hasil proses pengendalian motor induksi tiga fase. Sistem ini

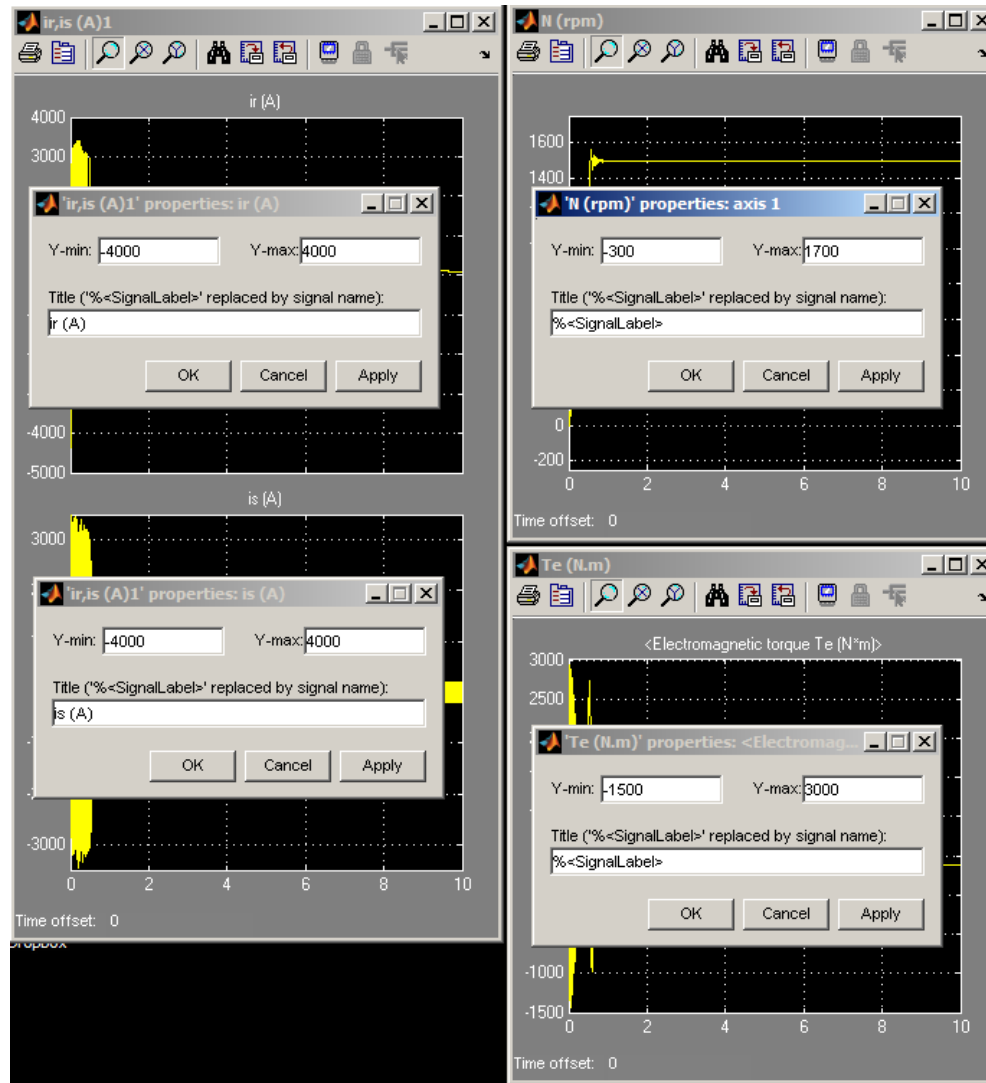


menyediakan *display* output berupa karakteristik dinamis arus rotor dan stator  $i_r, i_s$  (A), kecepatan putar rotor  $N$  (rpm), serta torsi elektromagnetik  $T_e$  (N m). Simulator juga menyediakan *display* tegangan eksitasi dan arus fase terhadap netral ( $V_{a-n}, I_s$ ), tegangan dan arus fase-ke-fase ( $V_{a-b}, I_s$ ), serta pulsa pemicu *thyristor* (*pulse display*) dalam fungsi waktu. *Display* output yang tersedia ditunjukkan oleh Gambar 21.



Gambar 21. *Display* Output Sistem

Setiap *display* output yang tersedia dapat ditampilkan dengan **double click** pada kotak berwarna hijau. Agar semua *display* dapat terlihat, lakukan minimalisasi jendela simulator dengan **click minimize** pada jendela tersebut. Untuk menghasilkan tampilan karakteristik dinamis yang proporsional terhadap ukuran jendela, lakukan pengaturan skala sumbu vertikal grafik dengan cara **click kanan** pada setiap *window* kemudian pilih **Axes properties** dilanjutkan dengan mengisi nilai Y-min dan Y-max seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 22. Pengaturan Skala Sumbu Vertikal (Y) Pada Display Karakteristik Dinamis Untuk Motor Jenis 215 HP Agar Tampilan Grafik Proporsional

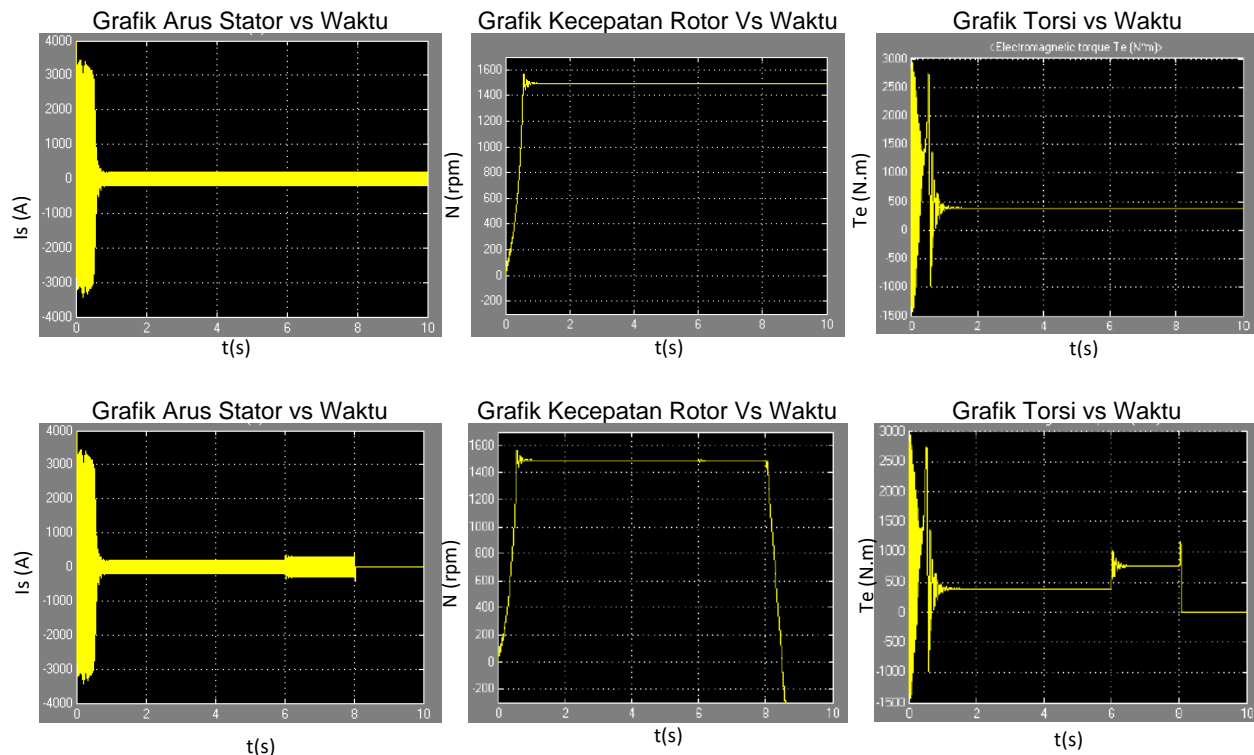
Untuk semua jenis motor yang tersedia pada simulator ini, nilai-nilai parameter Y-max dan Y-min agar tampilan grafik karakteristik dinamis terlihat proporsional terhadap ukuran jendela, ditunjukkan pada tabel berikut ini.

Tabel 7. Nilai Parameter Y-min dan Y-max Untuk Display Karakteristik Arus Rotor, Arus Stator, Kecepatan Putar Rotor dan Torsi Elektromagnetik

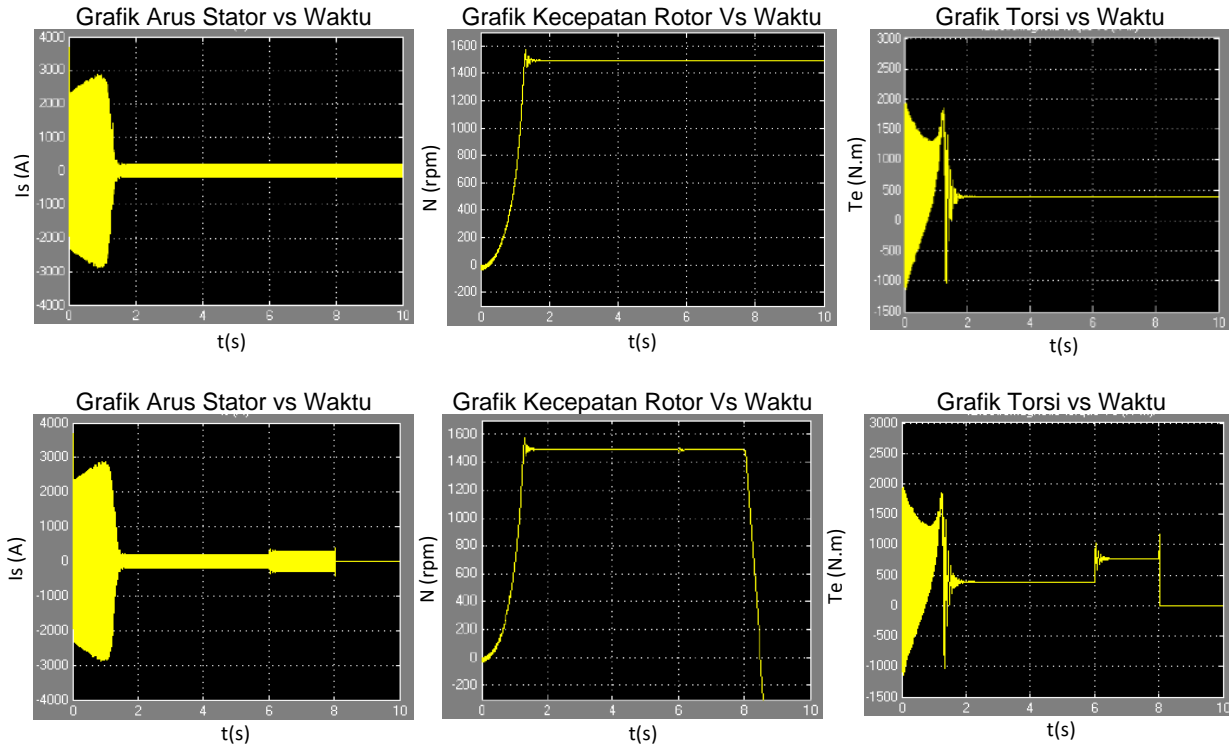
Jenis Motor	Axis Parameters							
	ir(A)		is (A)		N (rpm)		Te (N m)	
	Y-min	Y-max	Y-min	Y-max	Y-min	Y-max	Y-min	Y-max
215 HP	-4000	4000	-4000	4000	-300	1700	-1500	3000
150 HP	-3000	3000	-3000	3000	-300	1700	-1500	2500
100 HP	-2000	2000	-2000	2000	-300	1700	-1000	2000

50 HP	-1000	1000	-1000	1000	-300	1700	-500	1000
20 HP	-500	500	-500	500	-300	1700	-300	900
10 HP	-150	150	-150	150	-300	1700	-100	300
5,4 HP	-80	80	-80	80	-300	1700	-40	140
3 HP	-80	80	-80	80	-100	1800	-25	85

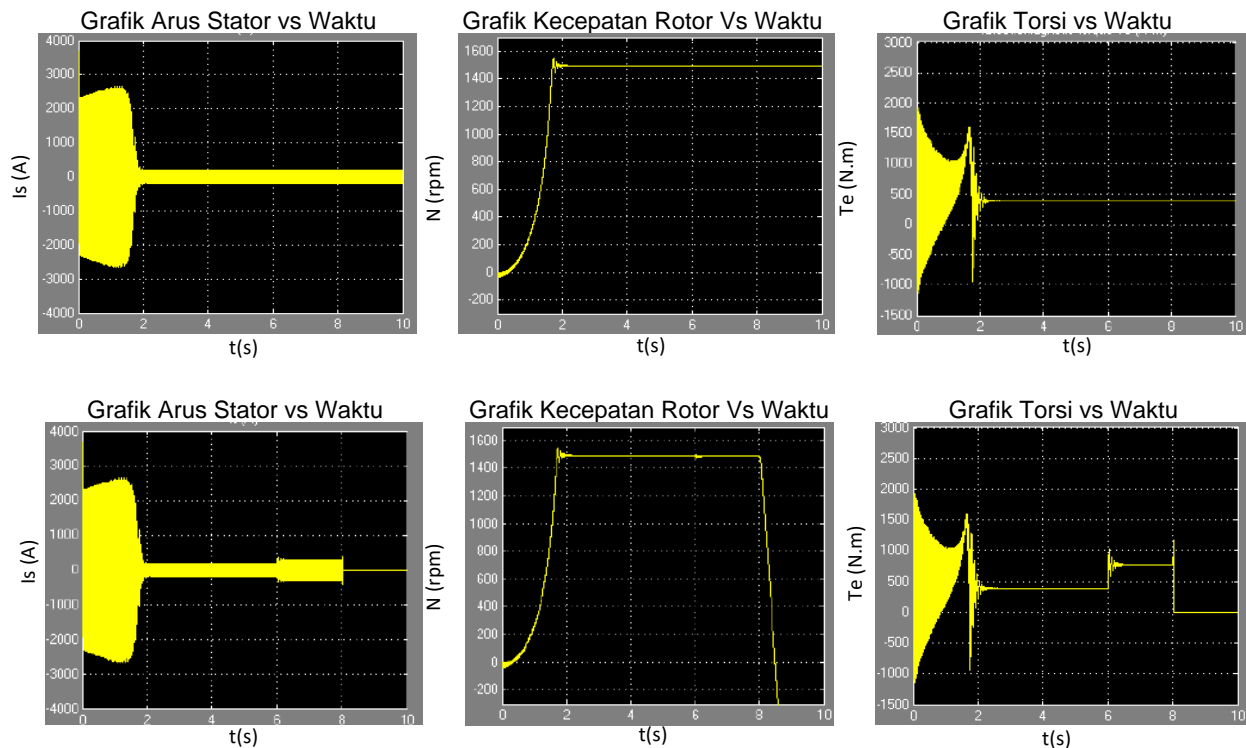
Jika pengaturan parameter sumbu (axis) pada semua *display* karakteristik dinamis dilakukan dengan mengikuti tabel 7 di atas, maka tampilan grafik akan proporsional. Untuk motor jenis 215 HP akan menghasilkan grafik seperti pada gambar-gambar berikut ini.



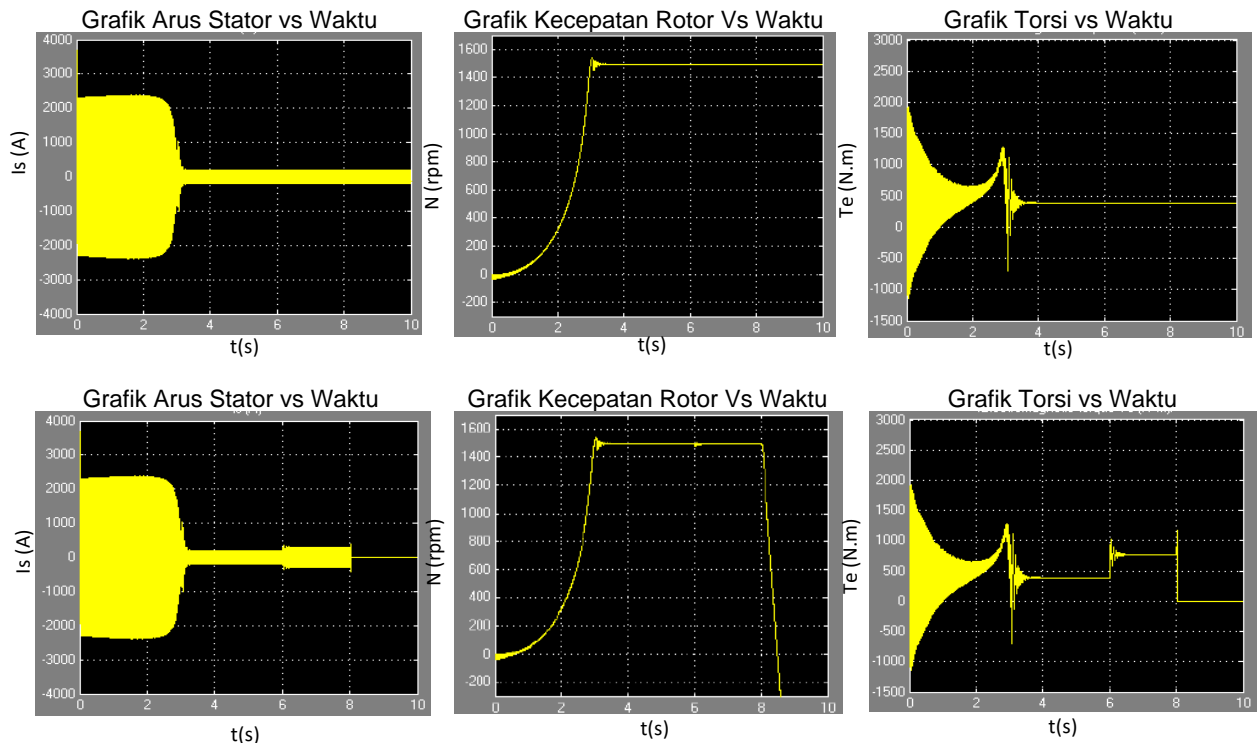
Gambar 23. Grafik Output Hasil Simulasi Menggunakan Skenario **Operasi Normal** (Atas) dan **Operasi Overloaded** (Bawah) dengan Catu Tegangan Langsung Menggunakan **Alfa Minimum=19.0** Listrik Untuk Motor 215 HP



Gambar 24. Grafik Output Hasil Simulasi Menggunakan Skenario **Operasi Normal** (Atas) dan **Operasi Overloaded** (Bawah) Dengan Catu Tegangan **Soft Start Cepat** Untuk Motor 215 HP



Gambar 25. Grafik Output Hasil Simulasi Menggunakan Skenario **Operasi Normal** (Atas) dan **Operasi Overloaded** (Bawah) Dengan Catu Tegangan **Soft Start Sedang** Untuk Motor 215 HP

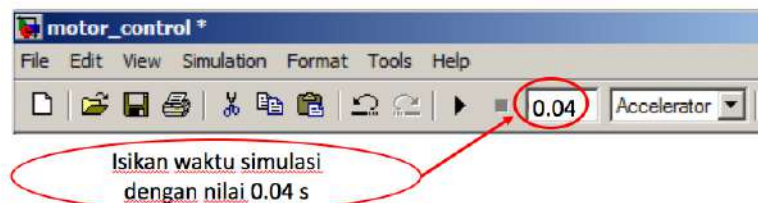


Gambar 26. Grafik Output Hasil Simulasi Menggunakan Skenario **Operasi Normal** (Atas) dan **Operasi Overloaded** (Bawah) Dengan Catu Tegangan **Soft Start Lambat** Untuk Motor 215 HP

## 2. Menampilkan Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Motor

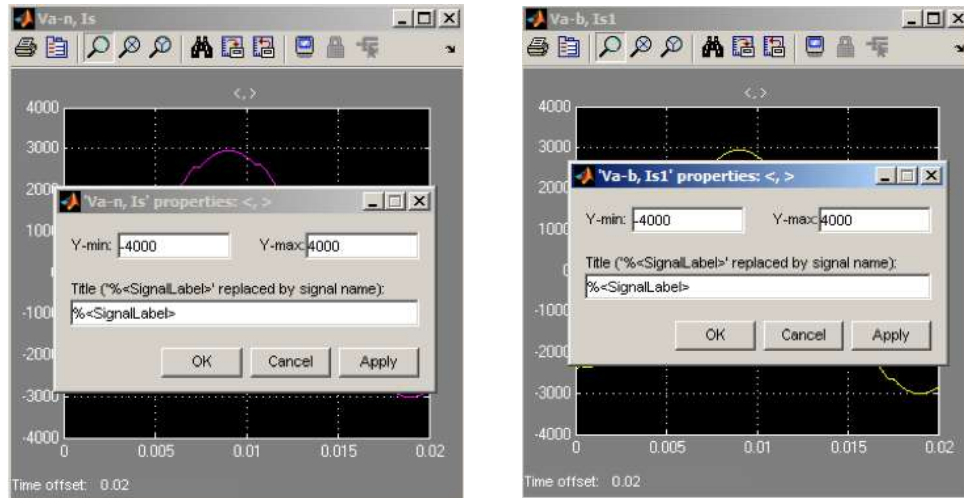
Bentuk gelombang tegangan eksitasi terhadap titik netral dan arus stator ditampilkan melalui  $display V_{a-n}, I_s$ , sedangkan tegangan fase-ke-fase dan arus stator ditampilkan menggunakan  $display V_{a-b}, I_s$ . Untuk menampilkan bentuk gelombang tegangan dan arus berbagai sudut pemucuan, lakukan langkah-langkah berikut ini.

- Gunakan mode catu daya langsung, dilakukan seperti langkah 9, **double click** pada **Pemilih Mode Catu Daya** dan isikan parameter **Constant value** dengan angka 1.
- Double click** pada blok **Minimum Alpha** dan isikan parameter **Constant value** dengan angka 150 (menunjukkan motor dikendalikan oleh tegangan catu yang dipicu oleh *thyristor* dengan sudut alfa 150° listrik).
- Ubah waktu simulasi menjadi 0.04 s sehingga menghasilkan tampilan seperti berikut ini.



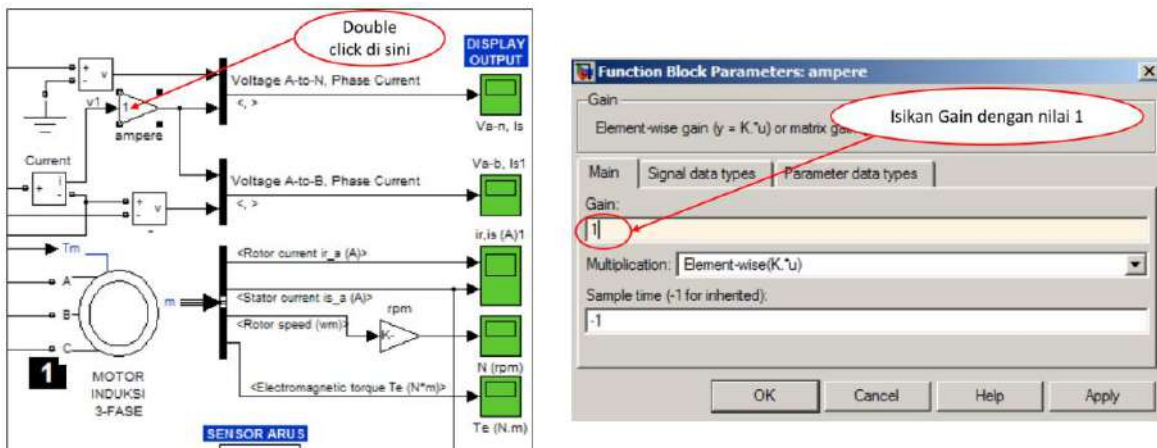
Gambar 27. Pengaturan Waktu Simulasi Untuk Menampilkan Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Fase Pada Berbagai Sudut Pemucuan *Thyristor*

- d. Agar tampilan grafik bentuk gelombang tegangan dan arus nampak proporsional terhadap ukuran jendela, lakukan pengaturan skala sumbu vertikal grafik dengan cara **click kanan** pada *window*  $V_{a-n}, I_s$  dan  $V_{a-b}, I_s$  kemudian pilih **Axes properties** dilanjutkan dengan mengisi nilai Y-min dan Y-max seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 28. Pengaturan Skala Sumbu Vertikal (Y) Pada Display Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Fase Untuk Motor Jenis 215 HP Agar Tampilan Grafik Proporsional

Selain itu, oleh karena dalam satu jendela ditampilkan dua besaran yang berbeda yakni arus dan tegangan, maka perlu diatur juga penguatan (gain) arus agar grafik keduanya nampak proporsional. Untuk motor jenis 215 HP pengaturan gain arus dilakukan seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 29. Pengaturan Gain Arus Agar Tampilan Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan Proporsional Untuk Motor Jenis 215 HP

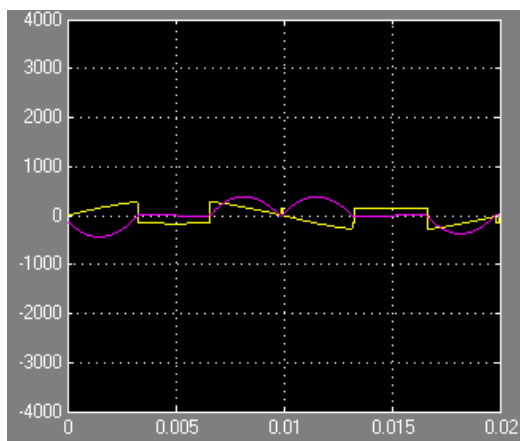


Untuk semua jenis motor yang tersedia pada simulator ini, pengaturan parameter skala sumbu vertikal (*axis parameters*) dan gain arus ditunjukkan pada Tabel 8 berikut ini.

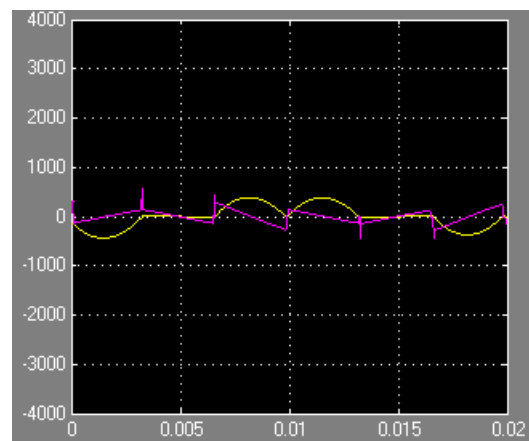
Tabel 8. Nilai Parameter Y-min dan Y-max Untuk Display Tegangan Eksitasi, Tegangan dan Arus Fase-ke-Fase Serta Gain Arus Agar Tampilan Grafik Proporsional

Jenis Motor	Axis Parameters				Gain Arus
	Va-n, Is		Va-b, Is		
	Y-min	Y-max	Y-min	Y-max	
215 HP	-4000	4000	-4000	4000	1
150 HP	-3000	3000	-3000	3000	1
100 HP	-2000	2000	-2000	2000	1
50 HP	-1000	1000	-1000	1000	1
20 HP	-500	500	-700	700	1
10 HP	-400	400	-600	600	2
5,4 HP	-400	400	-600	600	5
3 HP	-400	400	-600	600	2

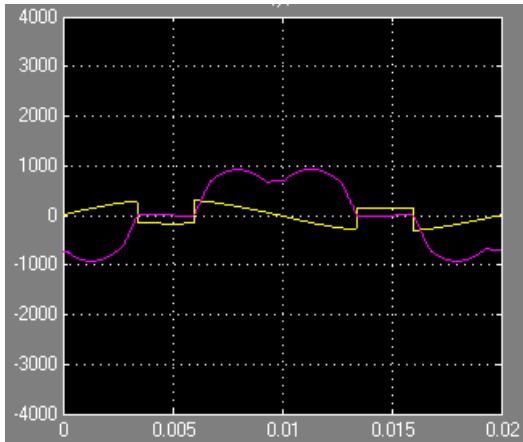
- e. Jalankan simulasi dengan *click* pada simbol *start simulation*, amati *display*  $V_{a-n}$ ,  $I_s$ , dan *display*  $V_{a-b}$ ,  $I_s$ . Jika langkah-langkah di atas dilakukan dengan benar, akan dapat terlihat bentuk gelombang tegangan dan arus seperti pada gambar-gambar di bawah ini.
- f. Lakukan kembali langkah-langkah di atas untuk sudut pemecuan yang lain, misalnya  $150^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $130^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $110^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $80^\circ$  dan  $19^\circ$  sehingga dihasilkan bentuk gelombang tegangan dan arus motor untuk berbagai sudut pemecuan alfa.



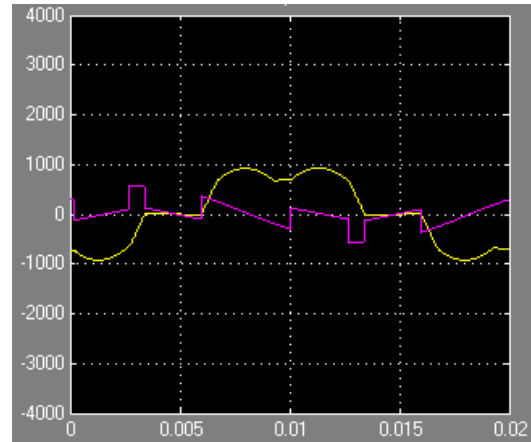
Gambar 30. Tegangan Eksitasi (Kuning)  $V_{a-n}$  (V) dan Arus Stator (Ungu)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk  $\text{Alfa}=150^\circ$  dan Jenis Motor 215 HP



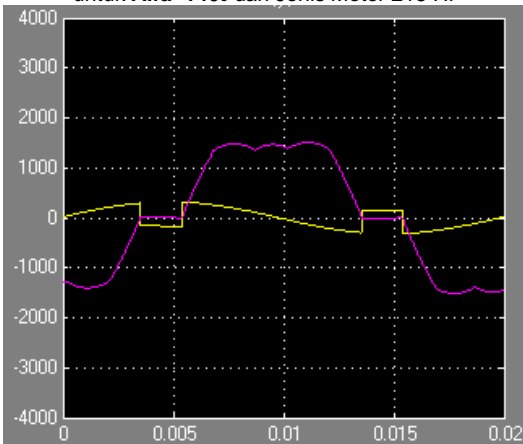
Gambar 31. Tegangan Fase-ke-Fase (Ungu)  $V_{a-b}$  (V) dan Arus Stator (Kuning)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk  $\text{Alfa}=150^\circ$  dan Jenis Motor 215 HP



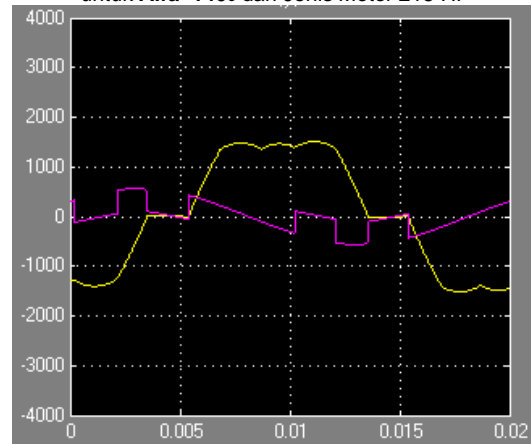
Gambar 32. Tegangan Eksitasi (Kuning)  $V_a-n$  (V) dan Arus Stator (Biru)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk  $\text{Alfa}=140^\circ$  dan Jenis Motor 215 HP



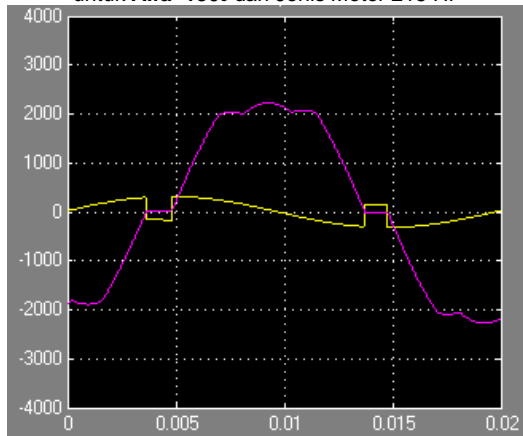
Gambar 33. Tegangan Fase-ke-Fase (Biru)  $V_a-b$  (V) dan Arus Stator (Kuning)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk  $\text{Alfa}=140^\circ$  dan Jenis Motor 215 HP



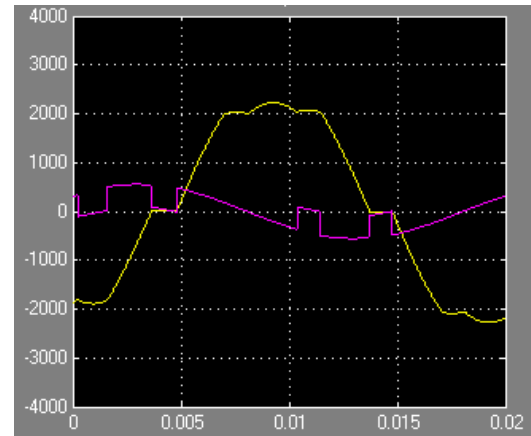
Gambar 34. Tegangan Eksitasi (Kuning)  $V_a-n$  (V) dan Arus Stator (Biru)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk  $\text{Alfa}=130^\circ$  dan Jenis Motor 215 HP



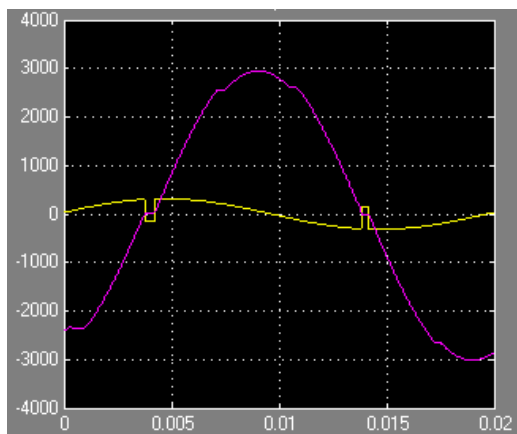
Gambar 35. Tegangan Fase-ke-Fase (Biru)  $V_a-b$  (V) dan Arus Stator (Kuning)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk  $\text{Alfa}=130^\circ$  dan Jenis Motor 215 HP



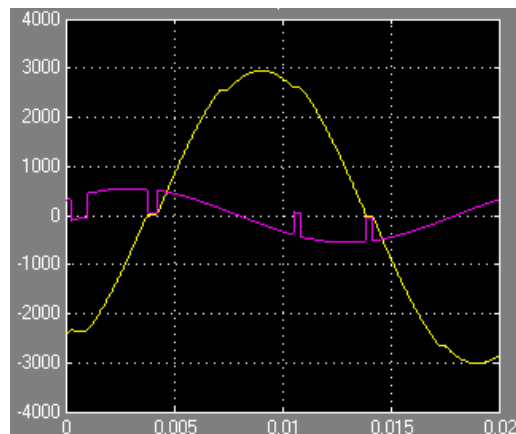
Gambar 36. Tegangan Eksitasi (Kuning)  $V_a-n$  (V) dan Arus Stator (Biru)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk  $\text{Alfa}=120^\circ$  dan Jenis Motor 215 HP



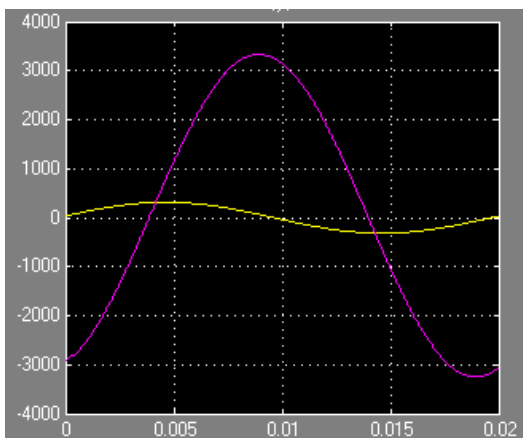
Gambar 37. Tegangan Fase-ke-Fase (Biru)  $V_a-b$  (V) dan Arus Stator (Kuning)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk  $\text{Alfa}=120^\circ$  dan Jenis Motor 215 HP



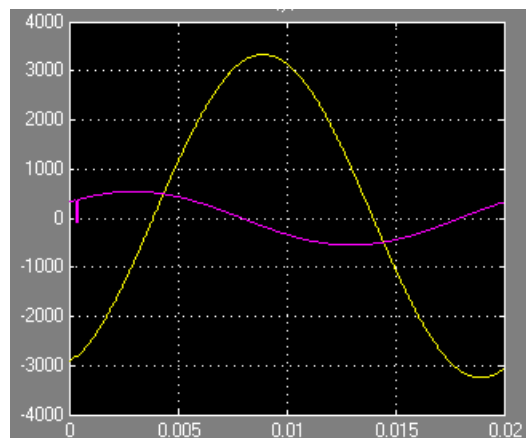
Gambar 38. Tegangan Eksitasi (Kuning)  $V_a-n$  (V) dan Arus Stator (Ungu)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk **Alfa=110%** dan Jenis Motor 215 HP



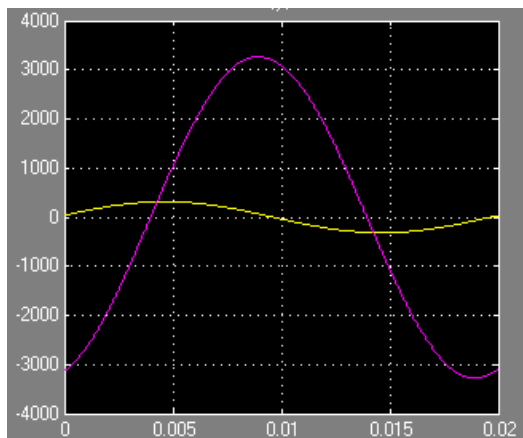
Gambar 39. Tegangan Fase-ke-Fase (Ungu)  $V_a-b$  (V) dan Arus Stator (Kuning)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk **Alfa=110%** dan Jenis Motor 215 HP



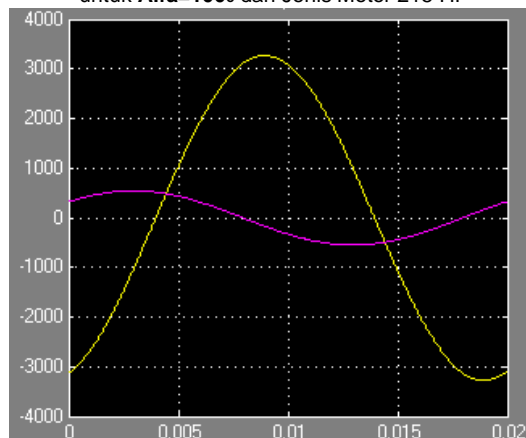
Gambar 40. Tegangan Eksitasi (Kuning)  $V_a-n$  (V) dan Arus Stator (Ungu)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk **Alfa=100%** dan Jenis Motor 215 HP



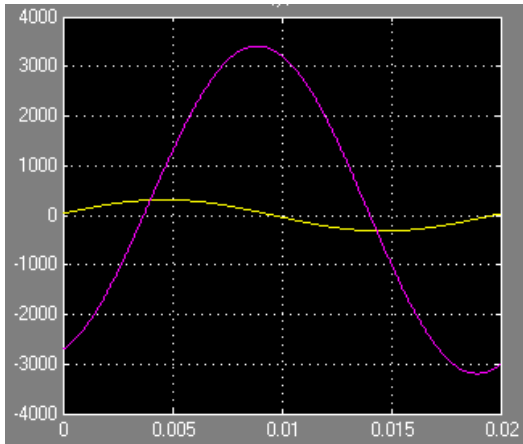
Gambar 41. Tegangan Fase-ke-Fase (Ungu)  $V_a-b$  (V) dan Arus Stator (Kuning)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk **Alfa=100%** dan Jenis Motor 215 HP



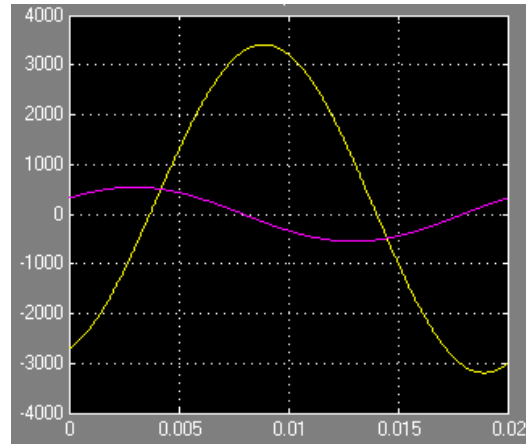
Gambar 42. Tegangan Eksitasi (Kuning)  $V_a-n$  (V) dan Arus Stator (Ungu)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk **Alfa=90%** dan Jenis Motor 215 HP



Gambar 43. Tegangan Fase-ke-Fase (Ungu)  $V_a-b$  (V) dan Arus Stator (Kuning)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk **Alfa=90%** dan Jenis Motor 215 HP



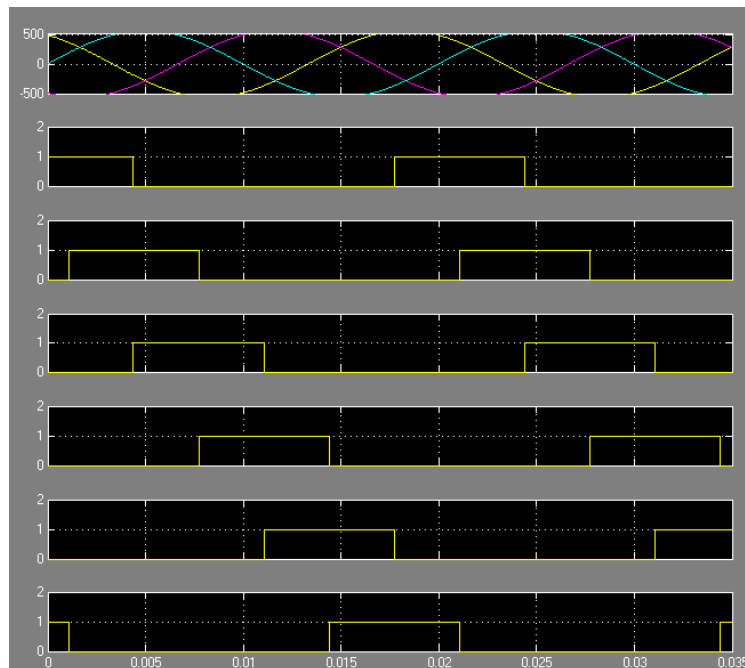
Gambar 44. Tegangan Eksitasi (Kuning)  $V_a-n$  (V) dan Arus Stator (Ungu)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk  $\text{Alfa}=19^\circ$  dan Jenis Motor 215 HP



Gambar 45. Tegangan Fase-ke-Fase (Ungu)  $V_a-b$  (V) dan Arus Stator (Kuning)  $I_s$  (A) Versus Waktu (s) untuk  $\text{Alfa}=19^\circ$  dan Jenis Motor 215 HP

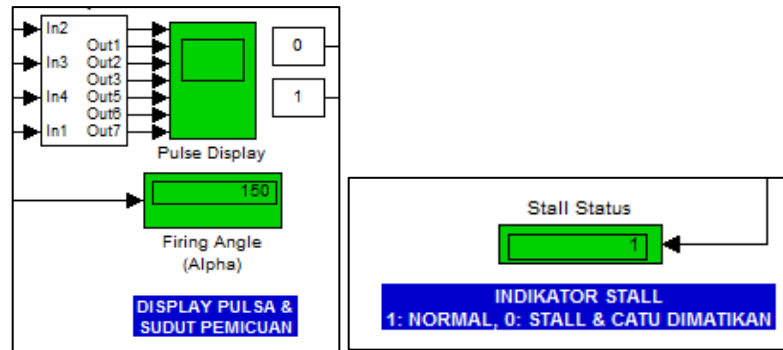
### 3. Menampilkan Pulsa Pemicu *Thyristor*

Selain dapat memperoleh tampilan karakteristik dinamis arus stator, torsi elektromagnetik, kecepatan putar rotor, bentuk gelombang tegangan dan arus motor untuk keperluan analisis kinerja sistem kendali berkinerja tinggi, pengguna juga dapat menampilkan bentuk gelombang pulsa pemicuan. Bentuk gelombang pulsa pemicuan yang digunakan untuk memicu *thyristor*, dapat dilihat dengan **double click** pada blok *Pulse Display* yang akan menghasilkan tampilan seperti pada Gambar 46.



Gambar 46. Tampilan Bentuk Gelombang Pulsa

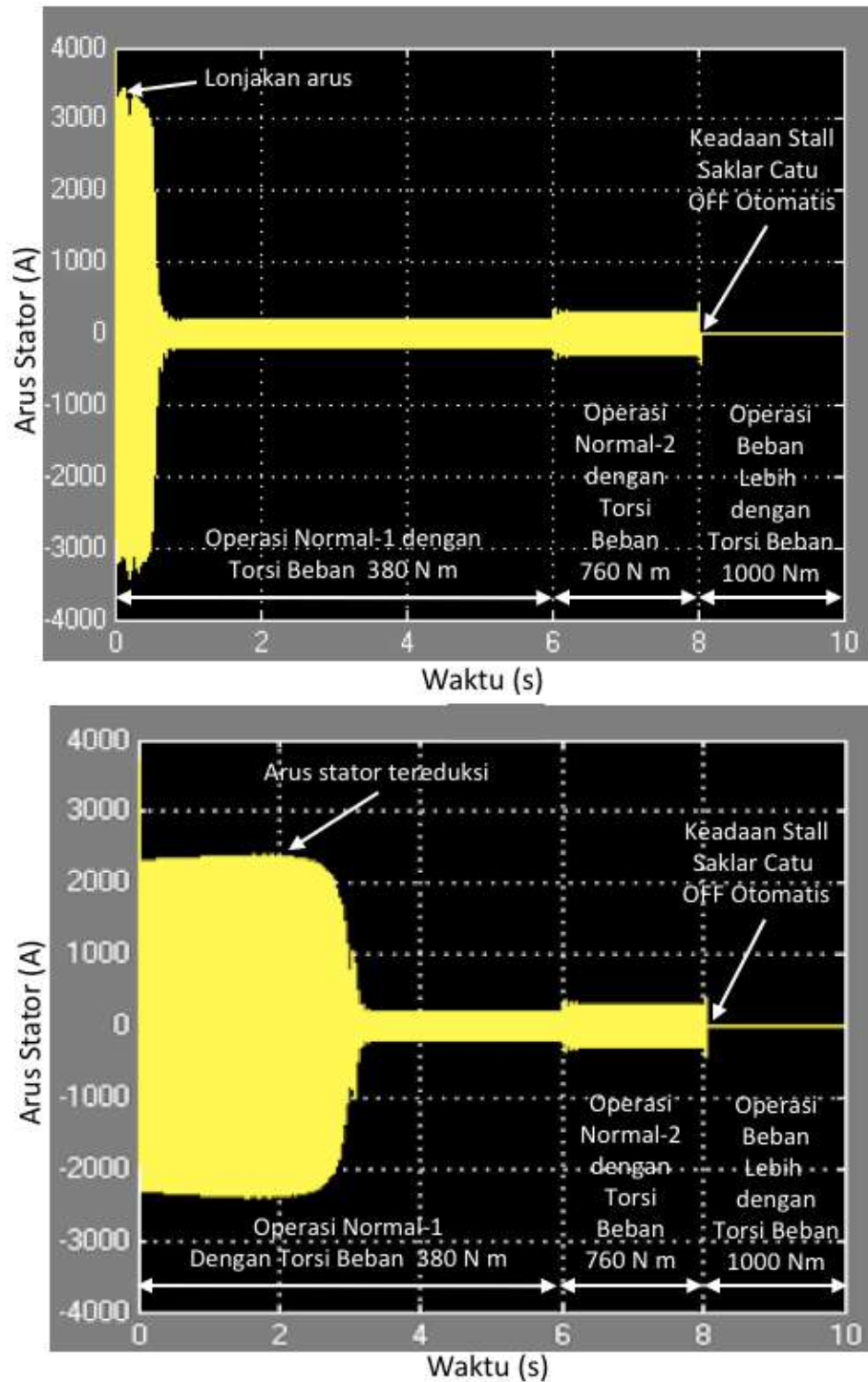
Selain menyediakan *display output*, sistem ini juga menyediakan tampilan numerik sudut pemicuan alfa dan *stall status*. Indikator *stall status*=1 menunjukkan operasi motor berjalan secara normal, dan sebaliknya jika *stall status*=0 motor mengalami keadaan *stall*.



Gambar 47. Indikator Numerik Sudut Pemicuan Alfa (kiri) dan *Stall* (kanan)

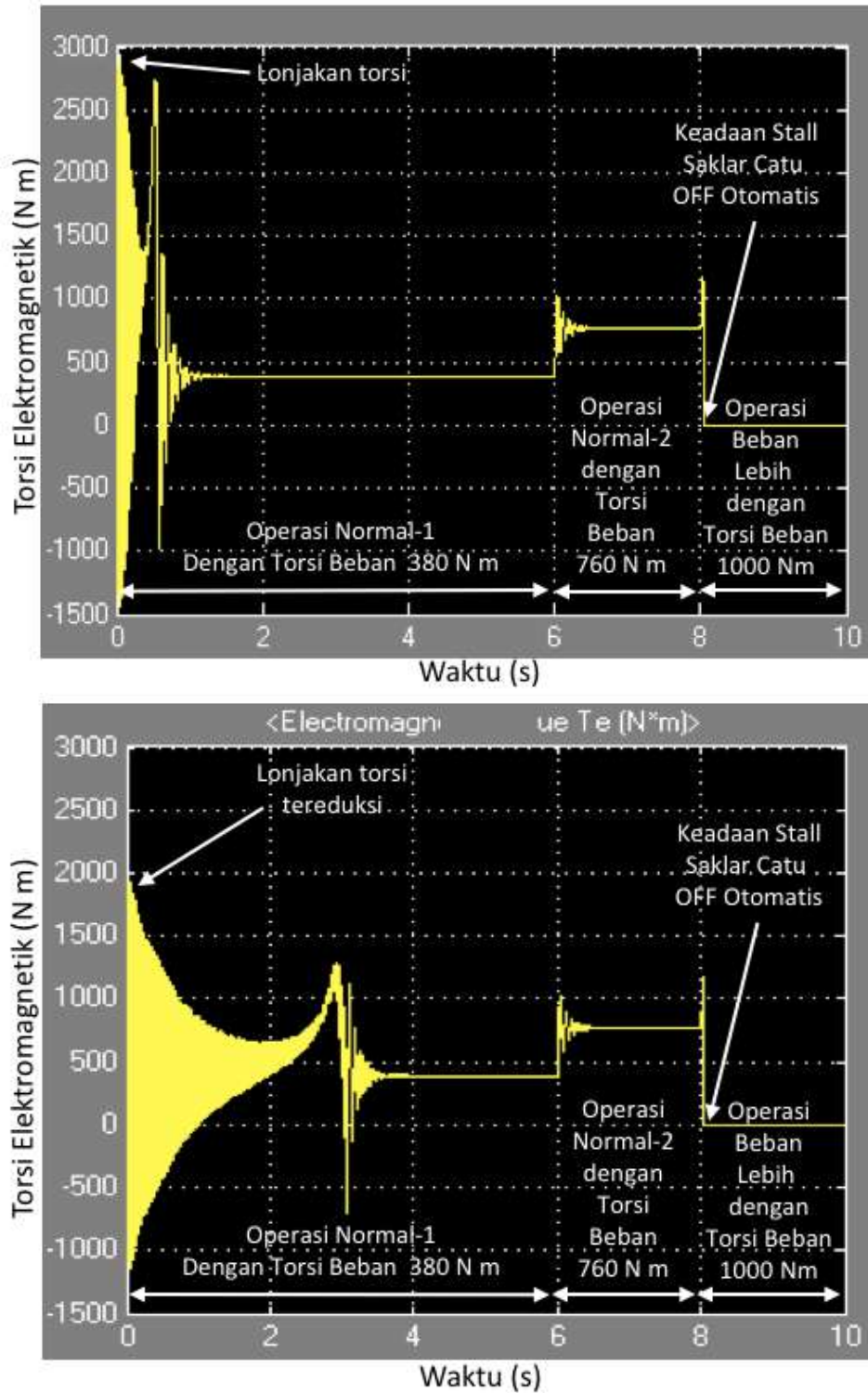
#### G. INTERPRETASI TAMPILAN OUTPUT

Sesuai dengan tujuan pengembangan perangkat pembelajaran ini yakni menyediakan media yang dapat digunakan untuk mempelajari sistem kendali motor berkinerja tinggi, maka diperlukan penjelasan tentang interpretasi dari hasil tampilan sistem ini yang mengarah pada kinerja sistem berkinerja tinggi. Perhatikan Gambar 48 dan Gambar 49 berikut ini!



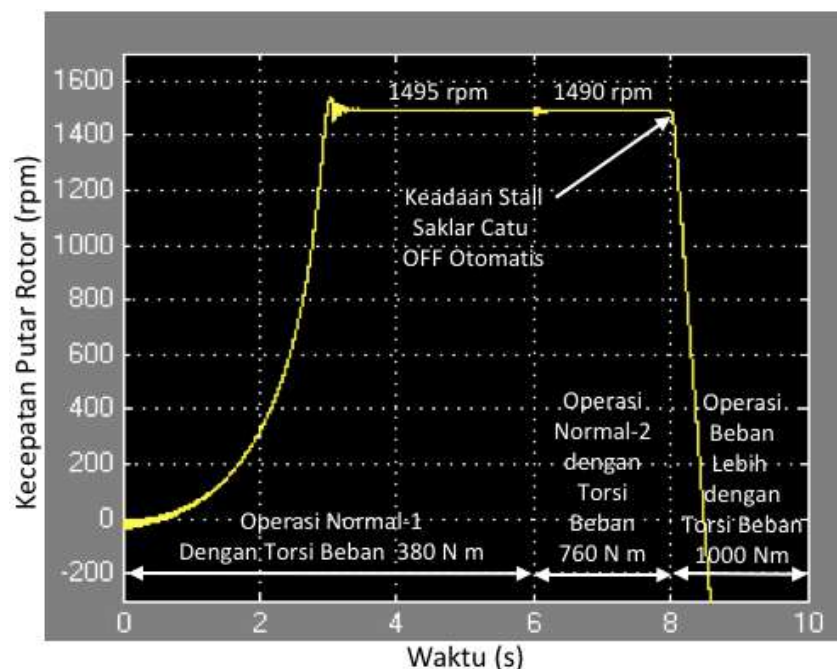
Gambar 48. Perbandingan Arus Stator Menggunakan Skenario Operasi Beban Penuh untuk Jenis Motor 215 HP: (a) Catu Langsung Menggunakan Alfa Minimum (kiri), dan (b) Soft Start Lambat (kanan)





Gambar 49. Perbandingan Torsi Elektromagnetik Menggunakan Skenario Operasi *Overloaded* untuk Jenis Motor 215 HP: (a) Catu Langsung Menggunakan Alfa Minimum (atas), dan (b) *Soft Start* Rendah (bawah)

Berdasarkan Gambar 48 dan Gambar 49 dapat diinterpretasikan bahwa sistem kendali telah berhasil melakukan pengaturan tegangan catu sehingga dapat mereduksi lonjakan arus stator dan torsi elektromagnetik saat motor melakukan *start-up*, dalam hal ini sistem kendali *soft-start* telah bekerja dengan baik pada kondisi transien. Untuk jenis motor 215 HP, selama kondisi *steady-state* sampai  $t=6$  s, motor berjalan normal dengan beban sebesar 380 N m. Pada kondisi sesaat setelah  $t=6$  s, motor diberi gangguan pertama yakni penambahan torsi beban menjadi 760 N m, dan oleh karena torsi ini masih di bawah torsi maksimum maka motor berjalan dengan normal. Selanjutnya, pada kondisi sesaat setelah  $t=8$  s motor diberi gangguan kedua dengan torsi beban sebesar 1000 N m, dan oleh karena nilai torsi bebannya melebihi nilai torsi maksimum, maka motor mengalami *stall*. Saat motor mulai mengalami *stall*, sistem kendali secara otomatis mematikan catu tegangan yang ditunjukkan oleh arus stator dan torsi elektromagnetik yang bernilai 0. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem kendali motor memiliki kinerja tinggi. Selanjutnya, perhatikan grafik respons waktu kecepatan putar rotor berikut ini!



Gambar 50. Grafik Respons Waktu Kecepatan Putar Rotor Menggunakan Skenario Operasi *Overloaded* dengan Mode Pencatu Tegangan *Soft Start* Lambat Untuk Jenis Motor 215 HP

Dari Gambar 50, dapat diinterpretasikan, setelah mencapai *steady-state* motor beroperasi normal dengan beban 380 N m. Kondisi normal juga berlangsung ketika sesaat setelah  $t=6$  s motor memperoleh tambahan torsi beban menjadi 760 N m, karena nilai torsi beban ini masih di bawah nilai torsi maksimum. Namun, sesaat setelah  $t=8$  s, ketika motor memperoleh torsi beban 1000 N m, motor mengalami *stall* sehingga kecepatan putar motor menurun secara drastis dan

sebelum berhenti berputar, sistem kendali mematikan secara otomatis catu tegangan motor. Kinerja tinggi dari sistem kendali ini telah ditunjukkan oleh kemampuannya dalam mereduksi lonjakan arus dan torsi *starting* serta dalam mengantisipasi terjadinya *stall*.

#### H. REKOMENDASI PENGGUNAAN

Perangkat ini hanya dapat bekerja dengan baik jika seluruh pengoperasiannya sesuai dengan spesifikasi sistem seperti disajikan pada Tabel 1 di atas. Pengguna tidak disarankan mengganti jenis motor kecuali dengan jenis motor yang tersedia pada simulator ini seperti tersaji pada Tabel 2 di muka. Pengubahan-pengubahan lain yang tidak direkomendasikan adalah pada sudut pemicuan minimum sebesar 19° listrik dan torsi beban pada operasi normal. Namun, pengguna masih dapat mengubah beberapa *setting-up* dari perangkat yakni torsi beban pada skenario operasi beban lebih (*overloaded*) dengan nilai di atas batas beban lebih pada Tabel 6, waktu pemberian gangguan, dan waktu simulasi.

Selamat menggunakan simulator ini!

## DAFTAR PUSTAKA

- Dewan, S. B., Slemon, G. R., & Straughen, A. (1984). *Power Semiconductor Drives*. Toronto: John Wiley & Sons.
- Eaton Corporation. (2013). Choosing between a soft starter and a variable frequency drive to t your application. *Industry Application IA04003002E*, 1–4. Retrieved from [http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@eaton/@corp/documents/content/pct\\_1110244.pdf](http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@eaton/@corp/documents/content/pct_1110244.pdf)
- Mackay, W. (2004). Compressor induction motor stall and rotation detection using microcontrollers. *Application Note AN2149 Freescale Semiconductor, Inc.*, 1–36. Retrieved from <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2149.pdf>
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications and Design* (Third Edit). Hoboken, Nj: John Wiley & Sons, Inc.
- Muchlas. (1998). *Sistem kendali soft-start motor induksi tiga fase berbasis mikrokontroler*. Universitas Gadjah Mada. Retrieved from [http://etd.repository.ugm.ac.id/index.php?mod=penelitian\\_detail&sub=PenelitianDetail&act=view&typ=html&buku\\_id=3509](http://etd.repository.ugm.ac.id/index.php?mod=penelitian_detail&sub=PenelitianDetail&act=view&typ=html&buku_id=3509)
- Muchlas. (2016). *Pengembangan simulator berbasis matlab untuk pembelajaran praktik karakteristik motor induksi tiga fase*. Penelitian tak diterbitkan. Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta.
- ON-Semiconductor. (2015, August). AMIS-30623/AMIS-30624/ NCV70627 stall detection. *Application Note AND8471/D*, 1–30. Retrieved from <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND8471-D.PDF>
- Rahman, M. F., Patterson, D., Cheok, A., & Betz, R. (2011). Motor drives. In M. H. Rashid (Ed.), *Power electronics handbook* (3rd ed., pp. 915–991). Burlington,MA: Elsevier Inc.
- Rockwell Automation. (2014). When to use a soft starter or an ac variable frequency drive. *Rockwell Automation Publication 150-WP007A-EN-P*, 1–22. Retrieved from [http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/150-wp007\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/150-wp007_-en-p.pdf)
- Shahnia, F., Moghbel, M., & Yengejeh, H. H. (2016). Motivating power system protection course students by practical and computer-based activities. *IEEE Transactions on Education*, 59(2), 81–90.
- Singh, V., Gupta, A., Gupta, A., Garg, A., Khandelwal, A., & Gupta, A. (2017). Induction motor protection system. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 3(3), 714–716.
- STMicroelectronics. (2013, December). L9942 back emf stall detection algorithm. *Application Note AN3327*, 1–22. Retrieved from [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/ff/6e/b3/3a/9d/ef/4d/56/CD00294593.pdf/files/CD00294593.pdf/jcr:content/translations/en.CD00294593.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/ff/6e/b3/3a/9d/ef/4d/56/CD00294593.pdf/files/CD00294593.pdf/jcr:content/translations/en.CD00294593.pdf)
- Unsworth, P. J. (1988). *US4767975 A*. United State Patent.